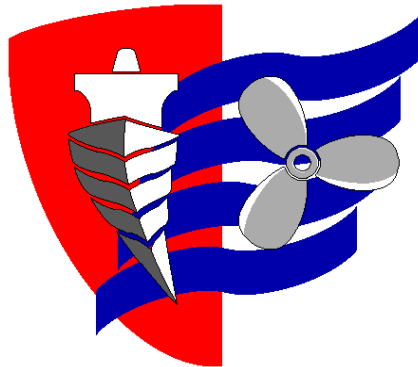


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL SECTOR FERROVIARIO

Para acceder al Título de

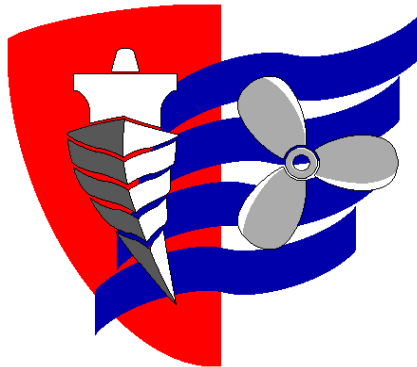
INGENIERÍA MARÍTIMA

JUNIO 2021

Autor: Germán Calleja Oria

Director: Alfredo Girón Portilla

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL SECTOR FERROVIARIO

Para acceder al Título de
INGENIERÍA MARÍTIMA
JUNIO 2021

Autor: Germán Calleja Oria

Contenido

1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	6
1.1 INTRODUCCIÓN	6
1.2 CONTENIDOS	6
2. CAPITULO 2: OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVOS	7
3. CAPITULO 3: LA RUEDA FERROVIARIA.....	8
3.1 INTRODUCCION	8
3.2 PARTES DE UNA RUEDA.....	8
3.3 TIPOS DE RUEDA.....	9
3.4 PARAMETROS A CONTROLAR.....	10
3.5 FABRICACIÓN DE RUEDAS	12
3.5.1 Proceso de forjado y laminado.....	13
3.5.2 Tratamiento térmico	16
3.6 ESFUERZOS QUE SOPORTAN LAS RUEDAS	18
3.7 TIPOS DE DAÑO EN RUEDA.....	19
3.7.1 Desgaste	19
3.7.1.1 Desgaste en la banda de rodadura.....	19
3.7.1.2 Desgaste de la pestaña.....	20
3.7.2 Fatiga	21
3.7.2.1 “Rolling Contact Fatigue”	21
3.7.2.2 Fatiga subsuperficial.....	24
3.7.2.3 Defectos en el velo	26
3.7.2.4 Defectos en el cubo	27
3.7.3 Deformación.....	27
3.7.3.1 Deformación lateral en la barra de rodadura.....	27
3.7.3.2 Colapso local de la banda de rodadura	28
3.7.3.3 Planos de rueda	29
3.7.3.4 Deformación de la punta de la pestaña	32
3.7.3.5 Desprendimiento en la pestaña	32
3.7.4 Térmico.....	33
3.7.4.1 Sobrecarga térmica.....	34
3.7.4.2 Fisuras térmicas laterales.....	34
3.7.5 Infraestructura.....	35

3.7.5.1	Marcas en la banda de rodadura.....	36
3.8	MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO EN RUEDA	37
3.8.1	Fisuras superficiales “Spalling”	38
3.8.2	Exfoliaciones “Shelling”	40
3.8.3	Inclusiones profundas “Shattering”	41
3.8.4	Fisuras térmicas.....	42
4.	INSPECCIÓN DE RUEDAS FERROVIARIAS	43
4.1	INTRODUCCIÓN	43
4.2	INSPECCION VISUAL.....	44
4.3	ANALISIS ACÚSTICO	45
4.4	PARTICULAS MAGNÉTICAS	45
4.5	LIQUIDOS PENETRANTES	46
	Según la solubilidad:.....	47
	Según el color:	47
4.6	TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS	49
4.6.1	Principios acústicos.....	49
4.6.1.1	Definiciones básicas	49
4.6.1.2	Definiciones básicas	52
4.6.1.3	Dispersión, difracción e interferencia	55
4.6.1.4	Disminución de la presión sónica.....	56
4.6.2	Principios básicos de los instrumentos.....	57
4.6.2.1	Generación de ultrasonido	57
4.6.2.2	Procedimiento de ensayo ultrasónico	59
•	Procedimiento de transmisión:	59
•	Procedimiento pulso-eco.....	60
	62
4.6.2.3	Palpadores	62
•	Palpador normal	64
•	Palpador de doble cristal	65
•	Palpador angular	66
•	Palpador de inmersión	66
4.6.2.4	Sistemas de representación	67
•	Representación “Tipo A”	67
•	Representación “Tipo B”	68
•	Representación “Tipo C”	69
4.6.2.5	Interpretación de la representación Tipo A	69
4.6.3	Procedimientos generales del ensayo ultrasónico.....	70

4.6.4	Ventajas y limitaciones.....	71
•	Ventajas.....	71
•	Limitaciones.....	71
4.7	MÉTODOS USADOS ACTUALMENTE	72
4.7.1	Método “Phased Array”	72
4.7.2	Sistema utilizado en torno de foso (Eurostar).....	73
4.7.3	Sistemas de ultrasonidos para inspeccionar ruedas tras el torneado (sistema desarrollado por la empresa Union Pacific Railroad)	73
4.8	INSPECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN BANDA DE RODADURA EN RUEDAS CIVIA.....	76
4.8.1	Equipos y materiales.....	77
4.8.2	Gráficas de referencia.....	77
4.8.3	Método de medición de discontinuidades.....	80
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	84
6.	REFERENCIAS	85

Resumen.

El presente proyecto, `` ensayos no destructivos en el sector ferroviario'', tiene por objetivo principal el mantenimiento de las ruedas ferroviarias usando los métodos de los END. Se inicia explicando cómo y que se la rueda ferroviaria, sus distintas partes, los tipos de ruedas, parámetros y como se fabrican estas ruedas ferroviarias.

Las ruedas pasan por procesos como el forjado y laminado y tratamientos térmicos que mejoran la calidad de la rueda y así soportar los esfuerzos que puedan dañar las ruedas.

Los daños de la rueda pueden ser de diferentes tipos; de desgaste, fatiga, deformación, térmico, infraestructura.... Pueden ser o claros a simple vista o que solo con una inspección exhaustiva se podrían localizar, aquí entran los ensayos no destructivos.

Tanto como en el mantenimiento correctivo, predictivo y preventivo se usan estos ensayos para verificar el correcto estado de las ruedas, el más usado en este sector tanto económicamente y su precisión es el ensayo por ultrasonidos.

Los ensayos no destructivos ultrasonido se utilizan para identificar discontinuidades en una pieza, se basan en el estudio de la reflexión de las ondas acústicas. Se envían unas ondas acústicas y se observa cómo es su comportamiento y su reflexión. Gracias a esta reflexión se puede identificar si existen o no discontinuidades e identificar el punto exacto dónde se encuentran.

Palabras clave: ferroviario, rueda, pestaña, ensayo, palpador, sensor, fisura, grietas, ultrasonidos, rail, banda de rodadura.

Summary

The present project, `` non-destructive tests in the railway sector ", has as its main objective the maintenance of railway wheels using NDT methods. It begins by explaining how and what is the railway wheel, its different parts, the types of wheels, parameters and how these railway wheels are manufactured.

The wheels go through processes such as forging and rolling and heat treatments that improve the quality of the wheel and thus withstand the efforts that can damage the wheels.

Wheel damage can be of different types; wear, fatigue, deformation, thermal, infrastructure.... They can be either clear to the naked eye or that only with a thorough inspection could they be located, this is where non-destructive testing comes in.

As well as in corrective, predictive and preventive maintenance, these tests are used to verify the correct condition of the wheels, the most used in this sector both economically and for its precision is the ultrasound test.

Non-destructive ultrasound tests are used to identify discontinuities in a part, based on the study of the reflection of acoustic waves. Acoustic waves are sent and its behavior and reflection are observed. Thanks to this reflection it is possible to identify whether or not there are discontinuities and to identify the exact point where they are.

Keywords: railway, Wheel, flange, test, probe, sensor, fissure, cracks, ultrasound, rail, tread

1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La acumulación de daño por fatiga, deformación plástica y desgaste reduce en gran medida la vida útil del material ferroviario. En la actualidad, el aumento de la velocidad y la carga por eje genera grandes tensiones en el contacto rueda-carril. Esta evolución ha provocado cambios en los principales daños que existen en la llanta, desde el desgaste hasta la fatiga.

La rueda es uno de los elementos clave del equipamiento ferroviario, pues una de las funciones más destacadas es: además de guiar el vehículo, también transmite tracción y fuerza de frenado a la vía.

La fatiga puede provocar una rotura grave de la rueda o la pérdida del material de la superficie de la banda de rodadura. Estas fallas pueden causar daños a los rieles, suspensión del tren y, aunque no ocurren con frecuencia, aún pueden descarrilar el tren en sí.

Por lo tanto, para los ejes ferroviarios, un plan de mantenimiento estricto es esencial para la seguridad de los trenes y controlar las grietas inducidas por la fatiga.

En este plan de mantenimiento es fundamental el estudio de las pruebas no destructivas que se pueden realizar porque son la mejor forma de detectar problemas en las ruedas.

Sin embargo, no existen normas ni procedimientos para el control de fisuras, se basan únicamente en cada entidad ferroviaria o empresa de mantenimiento, en función de su experiencia, y no existe un estándar uniforme.

1.2 CONTENIDOS

El contenido del trabajo se divide en tres capítulos: el primer capítulo es una introducción y una descripción general del contenido.

El capítulo 2 detalla los objetivos más importantes perseguidos en el Trabajo Fin de Grado.

El tercer capítulo introduce una descripción completa de la rueda de ferrocarril, así como el proceso de fabricación y todo el contenido relacionado con los tipos de daños que pueden ocurrir, especialmente la mecánica de fractura relacionada con la rueda de ferrocarril, debido al conocimiento previo del estado de la técnica. requiere conocimientos teóricos Estudian diferentes ensayos no destructivos en el mundo ferroviario, además, analizarán dos casos reales, uno con vibración y otro con ultrasonidos, para tener una visión práctica del contenido y contenido de este artículo. Este artículo resumirá brevemente el trabajo del trabajo, que se centrará en los aspectos más importantes y posibles trabajos futuros, así como las referencias y bibliografía utilizada.

2. CAPITULO 2: OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es estudiar varios métodos de ensayo no destructivos aplicados a las ruedas de tren en la industria ferroviaria.

- El objetivo principal es caracterizar las características de estos ensayos no destructivos, además de conocer las ventajas y limitaciones de estos ensayos, también se describen los últimos ejemplos que están llevando a cabo diferentes empresas ferroviarias. De esta forma, el objetivo es comprender las recomendaciones de inspección de ruedas más posibles y analizar cuál es mejor.
- Otro objetivo es analizar la investigación y el desarrollo para lograr métodos de inspección más confiables y seguros.
- Finalmente, el trabajo se centrará en los métodos más utilizados, como el ultrasonido, que introducirá los principios básicos del ultrasonido y ejemplos prácticos en la industria ferroviaria con el fin de analizar ruedas específicas del tren y observar si el método es confiable y seguro.

Para la consecución de estos objetivos se llevará a cabo lo siguiente:

- Se explicarán una serie de puntos que son fundamentales para la comprensión del ensayo, como el proceso de fabricación de la rueda o la

clasificación de fisuras según el tipo de daño.

3. CAPITULO 3: LA RUEDA FERROVIARIA

3.1 INTRODUCCION

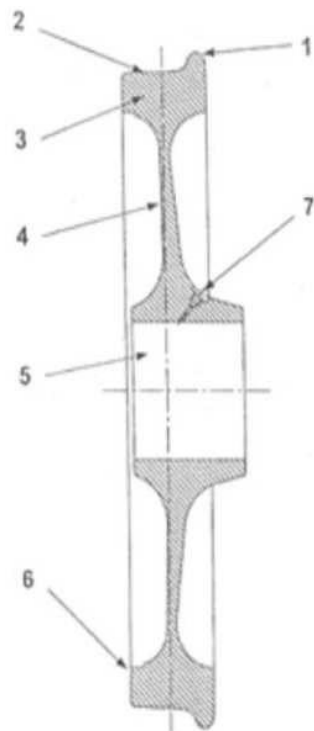
Los ferrocarriles tienen un modo de desplazamiento principalmente por ruedas de acero integradas que ruedan sobre raíles de acero, excepto en diversas situaciones, como trenes de levitación magnética y trenes que utilizan ruedas neumáticas.

La función de las ruedas del tren es apoyar, guiar y trasladarse a la vía para poder circular, acelerar y frenar en la curva. Cada una de estas funciones crea tensión mecánica y térmica en la rueda.

El mantenimiento y el diagnóstico de posibles daños en las ruedas es fundamental para la seguridad del tren, ya que las grietas y grietas pueden hacer que el tren se descarrile.

3.2 PARTES DE UNA RUEDA

Las partes básicas de la rueda se muestran en la figura 1 [1]:



1. PESTAÑA
2. BANDA RODADURA
3. LLANTA
4. VELO
5. CUBO
6. LIMITE MAXIMO DESGASTE
7. ALOJAMIENTO DE CALADO

FIGURA 1 PARTES DE UNA RUEDA
FUENTE: [1], pág. 39

- **Pestaña:** Aro saliente en el borde de la llanta de un vehículo ferroviario, destinado a impedir el descarrilamiento.
- **Banda rodadura:** Superficie de contacto entre llanta y carril.
- **Llanta:** Corona circular metálica que, calada sobre el núcleo, constituye la superficie de rodadura de la rueda sobre el carril.
- **Velo:** Corona circular metálica que une la llanta al cubo de la rueda.
- **Cubo:** Elemento mecánico que establece la unión de la rueda y el eje.
- **Límite máximo de desgaste:** Es el límite hasta el cual se puede reperfilear una rueda en condiciones de seguridad.
- **Alojamiento de calado:** dispositivo mediante el cual se introduce aceite a presión para el calado de la rueda.

3.3 TIPOS DE RUEDA

Los diferentes tipos de ruedas dependen de cómo se fija la llanta al velo. [2].

- Rueda monobloque: la llanta y el velo están conectados por un radio uniforme, y la llanta y el velo pertenecen a la misma unidad (ver Figura 2).

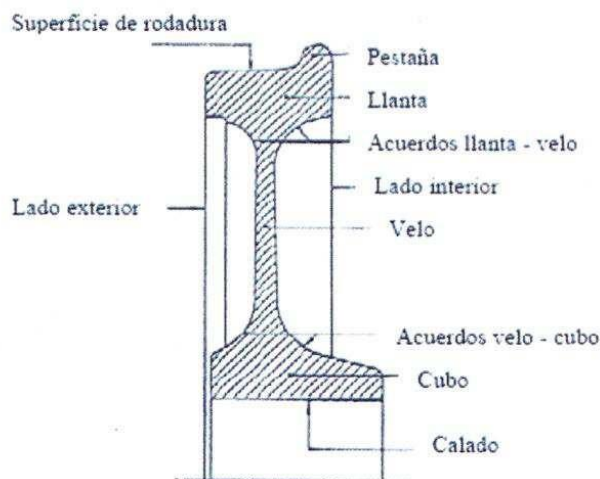


FIGURA 2 RUEDA MONOBLOQUE FUENTE: [2], pág. 39

- **Centro y bandaje:** La llanta se une al velo a través de un aro metálico denominado cincho, con calado caliente. En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo (ver figura 3)

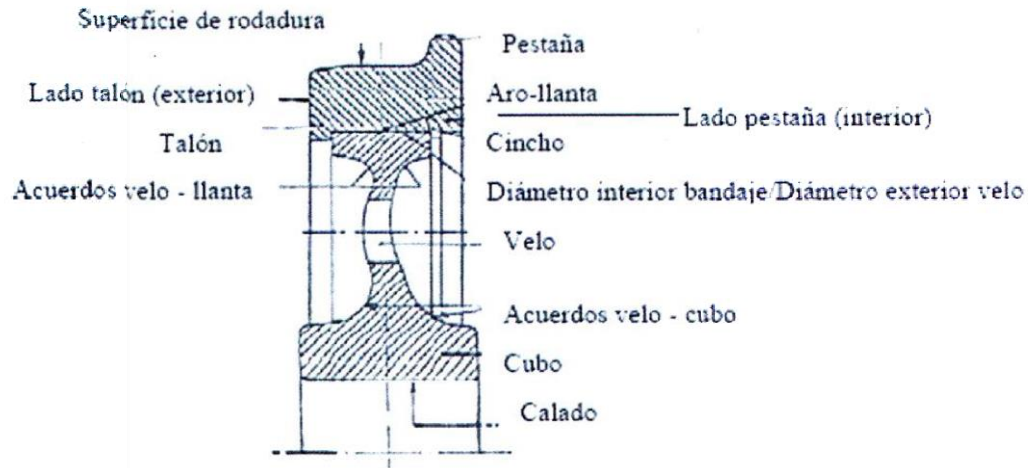


FIGURA 3 RUEDA CON CENTRO Y BANDAJE FUENTE: [2], pág. 40

- **Rueda elástica:** La llanta se une al velo a través de una banda de goma. En este caso también es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo (ver figura 4). La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros.

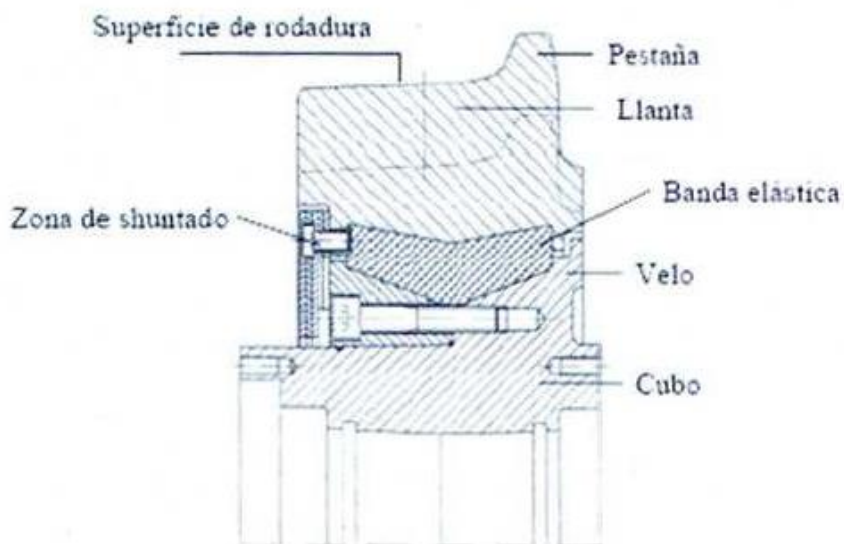


FIGURA 4 RUEDA ELÁSTICA FUENTE: [2], pág. 41

3.4 PARAMETROS A CONTROLAR

Ciertos parámetros clave en las ruedas de ferrocarril deben ser controlados y medidos con precisión, ya que, si alguno de ellos supera el límite establecido, será motivo de reperfilado o sustitución. [3].

- **Espesor de la pestaña (S_d):** El espesor de pestaña, es la distancia horizontal entre la intersección de la superficie interior de la rueda y el perfil de la pestaña, ubicada 10 mm por encima del diámetro de rodadura. (D) (Ver Figura 3.5).
- **Altura de pestaña (Sh):** La altura de pestaña, es la distancia vertical entre el diámetro de rodadura (D), y la línea tangente al punto superior de la pestaña (ver Figura 5).
- **Cota "qR":** El término "qR" se utiliza para definir la distancia horizontal entre dos puntos que interfieren con la pestaña. El primer punto es el punto (A) 10 mm por encima del diámetro de laminación (D), y el segundo punto (B) se encuentra 2 mm por debajo de la línea tangente a la superficie superior de la brida (consulte la Figura 5).
- **Diámetro de rodadura (D):** El diámetro de rodadura es la distancia entre dos puntos diametralmente opuestos que se cruzan con la banda de rodadura y están ubicados en un plano paralelo a la superficie interior de la rueda, a 70 mm de la superficie interior de la rueda (ver Figura 5).

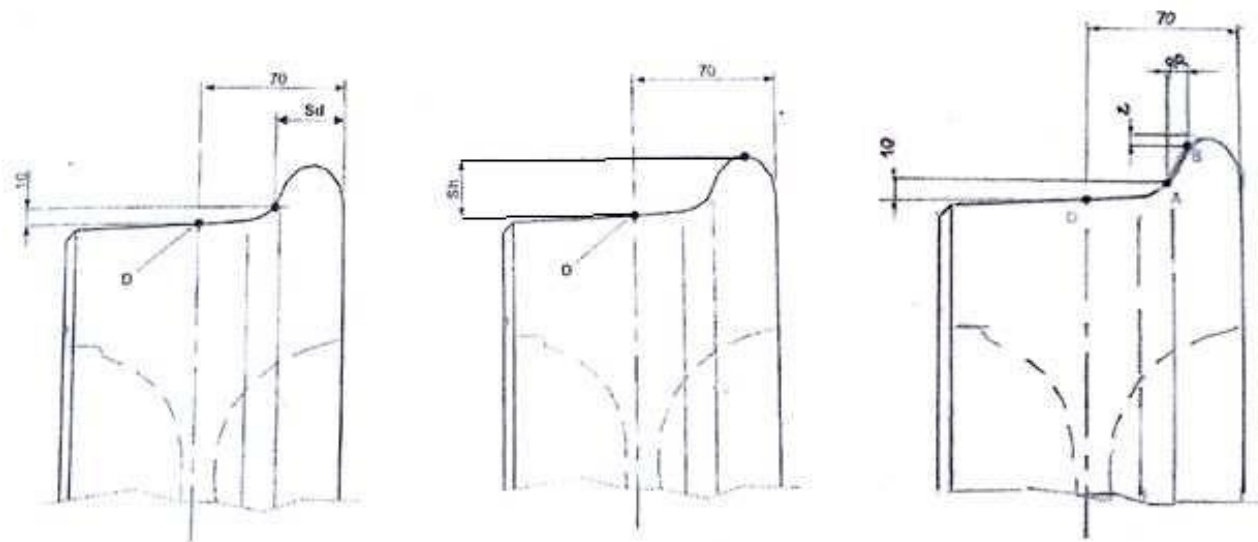


FIGURA 5 PARAMETROS A CONTROLAR FUENTE: [3], pág. 46

- **Ovalamiento:** El valor del ovalamiento viene determinado por la diferencia entre el diámetro máximo y el diámetro mínimo, que se deriva de los resultados de la

medición del diámetro de rodadura de la misma rueda en tres puntos diferentes separados por 120° (ver Figura 6).

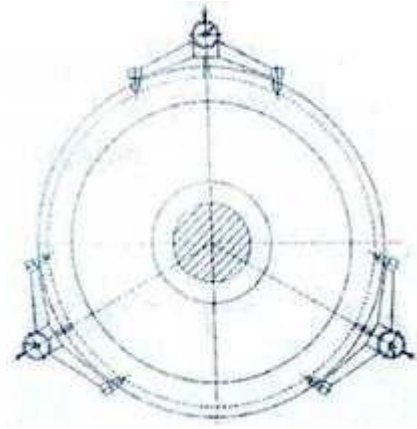


FIGURA 6 OVALAMIENTO FUENTE: [3], pág. 47

- **Distancia entre caras internas:** Es la distancia horizontal existente entre las caras internas de un mismo eje (ver Figura 7).

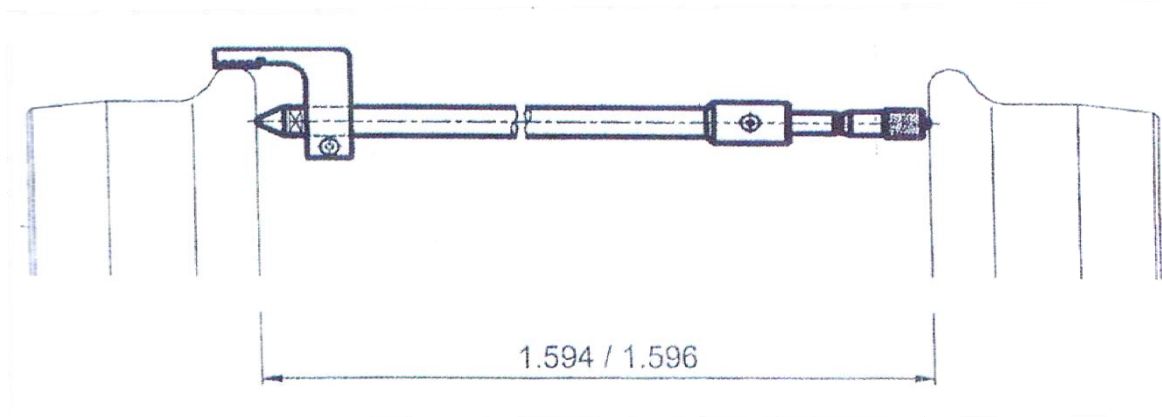


FIGURA 7 DISTANCIAS ENTRE CARAS INTERNAS FUENTE: [3], pág. 48

- **Diferencia de diámetro entre ruedas de un mismo eje.**
- **Diferencia de diámetro entre ruedas del mismo bogie.**
- **Diferencia de diámetro en ruedas motrices de un mismo coche.**

3.5 FABRICACIÓN DE RUEDAS

La fabricación de ruedas es un proceso crítico pues es donde las inclusiones y defectos se originan, estos pueden derivar en problemas catastróficos.

Las ruedas de acero se pueden fabricar mediante dos procesos: forja o colada. El

procedimiento utilizado en Europa es la forja, mientras que el procedimiento utilizado en Estados Unidos es más usado la colada.

Posteriormente, el borde se enfría y se temple para mantener el velo y el buje en un estado normal.

En el caso europeo, es decir, para ruedas forjadas, se explican de forma resumida las operaciones necesarias para obtener finalmente las ruedas. En primer lugar, nos centraremos en los procesos de forja y laminación, para luego comentar el tratamiento térmico realizado [4].

La fabricación de ruedas es un proceso crucial, porque es un lugar donde se generan inclusiones y defectos que pueden derivar en problemas catastróficos.

3.5.1 Proceso de forjado y laminado

La secuencia de pasos es la siguiente:

1. La materia prima es un bloque cortado de un lingote o varilla de material continuo, con estrechas tolerancias de peso, y se calienta a la temperatura de forja en un horno de solera giratoria. Los ladrillos calentados se transportan fuera del horno, se lavan con agua a alta presión para eliminar las impurezas, se pesan y luego se forjan dos veces, lo que se denomina rueda vacía (ver Figura 8).



FIGURA 8 PREFORMA CON PRESA. FUENTE: [4], pág. 74

2. Después de la limpieza anterior, el manipulador aplicará presión en la primera estación para colocar el bloque. Mediante el centrador integrado en la prensa, el carro se centra con el eje de la herramienta, y la expansión del material es la misma en la operación de prensado posterior.

3. Una vez finalizado el prensado, la rueda en blanco es sometida a manipulaciones para que alcance el contorno requerido. Utilice los diferentes rodillos que componen la máquina para realizar el trabajo de reperfilado en diferentes pasos. Consiga el grosor óptimo, dé forma a la banda de rodadura, los pliegues y los contornos internos y, finalmente, alcance la altura de llanta requerida (consulte la Figura 9).

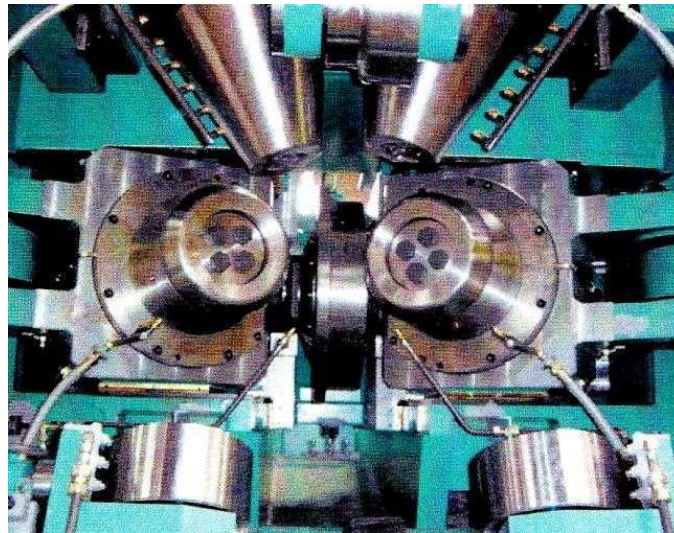


FIGURA 9 OPERACIÓN DE REPERFILADO FUENTE: [4], pág. 76

Debido a la posición vertical de la rueda durante el proceso de perfilado, se pueden evitar en gran medida los defectos superficiales. Dependiendo de la dirección en la que se forme la rueda, este proceso genera tensión de compresión en la rueda. Este hecho tiene un efecto beneficioso sobre el rendimiento del material y su precisión de medición.

La distancia entre los rodillos y el grosor se controlan a medida que aumenta el diámetro de la muela durante el proceso de formación. En el último paso de formación, la altura de la llanta se alcanza ajustando los dos rodillos laterales (ver Figura 10).

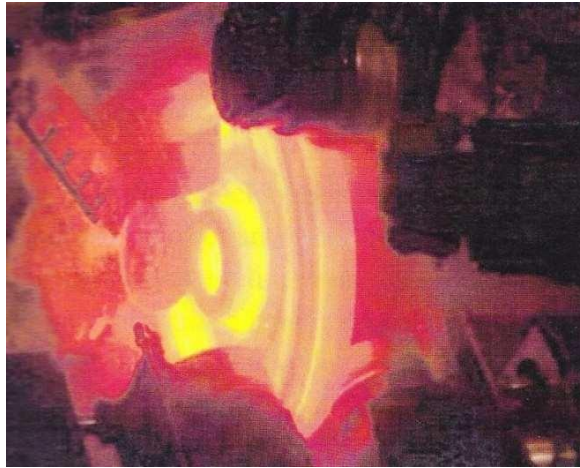


FIGURA 10 OPERACION DE CONFORMADO FUENTE: [4], pág. 89

La fuerza de conformado se genera mediante presión hidráulica y se transmite a la rueda en blanco a través de diferentes herramientas. A través de varios dispositivos (como válvulas), bajo la supervisión de ajuste electrónico y control de bucle, de acuerdo con los requisitos del proceso de moldeo, puede ser muy sensible y adaptarse inmediatamente al movimiento y la presión de trabajo

4. El manipulador saca todas las ruedas formadas del dispositivo de descarga y luego las transfiere a la parte inferior de la matriz para deformar las almas de las ruedas (ver Figura 11).



FIGURA 11 RUEDA DEFORMADA EN PRENSA FUENTE: [4], pág. 90

5. La siguiente operación es perforar la parte central de la rueda a través de un cilindro penetrante conectado al cabezal de la prensa. Después de completar la operación, durante la extracción del cilindro, las piezas deben agruparse. Mientras se retira el émbolo, la rueda de presión y perforación se separa de la prensa mediante un elevador. El manipulador es responsable de mover la muela de la prensa de deformación a la máquina de marcado.

6. Todo el proceso está controlado por un equipo de medición láser responsable del control del tamaño de la rueda. Para explorar todas las partes de la rueda, el sistema se instala en un plato giratorio de 360° para que el operador pueda obtener el mejor apoyo y pueda ser corregido en la línea de producción para evitar la producción de ruedas inválidas. Después de analizar los resultados de la medición, el robot lleva las ruedas al nuevo equipo de transporte y luego a la instalación de tratamiento térmico.



FIGURA 12 CARGA DE LAS RUEDAS ACABADAS EN UNA LÍNEA DE TRANSPORTE
FUENTE: [4], pág. 95

3.5.2 Tratamiento térmico

El endurecimiento de la llanta incluye calentar la rueda a 827°C en un horno para eliminar la tensión generado en la forja. Luego enfríe el borde con agua pulverizada durante unos segundos. Dado que la primera temperatura es más alta que la temperatura de transición de fase, la transformación de austenita a perlita ocurre

durante el proceso de enfriamiento. La microestructura de la perlítica es la que confiere a la llanta una gran dureza.

En este momento, la llanta se enfría y se contrae, mientras que el eje y el velo todavía están calientes y relativamente suaves. Se deja que las ruedas se enfríen en el aire durante unos 4 minutos y luego dejarlas en un horno a 480 ° C durante 2 horas para aliviar parte del estrés generado durante el proceso de enfriamiento de los neumáticos. Durante este período, el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transición y se encogen al apretar la llanta, haciendo que la llanta sea más rígida. Este fenómeno introduce una tensión de compresión residual en la llanta. Finalmente, deje que la muela se enfríe a temperatura ambiente durante aproximadamente 6 horas.

El resultado es que la superficie inferior de la llanta y el velo están en tracción, mientras que el resto de la llanta está en compresión. Este estado de tensión de compresión residual evita la formación y el crecimiento de grietas, reduciendo así el riesgo de falla de reparación. El campo de tensión residual de compresión resultante está a unos 40 mm de la banda de rodadura. A medida que la rueda se desgasta, el neumático es reperfilado, la capa de tensión de compresión desaparece y la banda de rodadura se acerca a la capa de tensión de tracción.

En Europa, las ruedas se suministran de acuerdo con la hoja UIC 812-3 (5a edición de enero de 1984) "Especificaciones técnicas para el suministro de ruedas monolíticas laminadas de acero no aleado para vehículos de motor y vehículos de remolque", y 8 posibles calidades (R1 a R8), y sus características se muestran en la Tabla 1 [5].

Calidad	Composición química (% máximo en peso)											Propiedades mecánicas		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	1+2+3	R _m (N/mm ²)	A(%)	KU (J)
R1	0,48	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	600-720	12-18	15
R2	0,58	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	700-840	9-14	10
R3	0,70	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	800-940	7-10	10
R6	0,48	0,40	0,75	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	780-900	15	15
R7	0,52	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	820-940	14	15
R8	0,56	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	860-980	13	15
R9	0,60	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	900-1050	12	10

Tabla 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS RUEDAS SEGÚN LA CALIDAD DE LA MISMA FUENTE: [5], pág. 41

3.6 ESFUERZOS QUE SOPORTAN LAS RUEDAS

La alta tensión en las ruedas se debe a la carga de la rueda y la fuerza de guiado. La banda de rodadura es la parte de la rueda que soporta mayor resistencia, que se produce en la pisada de la rueda motriz y la rueda que aplica el freno, patinaje y alta carga térmica.

Las fuerzas experimentadas por las ruedas pueden clasificarse desde la perspectiva de mostrar su tiempo transcurrido, o desde la fuente de la fuerza [2]. Desde la perspectiva del tiempo y el espacio que manifiestan, estos esfuerzos se pueden dividir en:

- **Esfuerzos constantes o de variación lenta en el tiempo.** Después de un frenado prolongado, se generarán tensiones residuales de fabricación, tensiones de pérdida de ruedas y ejes y tensiones permanentes.
- **Esfuerzos que se manifiestan de forma intermitente.** Las tensiones debidas a gradientes térmicos.
- **Esfuerzos cíclicos.** Se manifiestan en la zona elástico-plástica donde la rueda y el carril están en contacto, y son tensiones relacionadas con la rodadura. Son provocados por cargas, tensiones de tracción y pseudodeslizamientos. Incluso si la carga no es muy alta, el área de contacto de la llanta se deformará plásticamente en la llanta. Durante el primer ciclo de carga, la tensión residual se introduce en la rueda y la tensión residual, junto con la deformación existente, endurecerá el material.

La otra clasificación de los esfuerzos desde el punto de vista de su origen es:

- **Esfuerzos térmicos.** Debido a la pérdida de adherencia entre la rueda y el carril, se produce la acción de frenado y motor o deceleración al resbalar, provocando la aparición de estas fuerzas, que afectan principalmente a la zona de la banda de rodadura y pueden conducir a la transformación metalúrgica en el acero (templado del área de deslizamiento). Un frenado fuerte generará tensiones que superan el límite elástico del material en determinadas zonas, lo que da lugar a cambios en el campo de tensiones residuales, lo que conduce a fisuras

profundas.

- **Esfuerzos mecánicos.** Debido a la carga de la rueda y al guiado en la vía, la presencia de fuerzas verticales en la banda de rodadura y fuerzas laterales en las pestanas durante el contacto de rodadura provoca la aparición de fuerzas mecánicas.

El esfuerzo depende del diseño del bogie, el diámetro y el tipo de rueda, la carga del eje, el valor de masa no suspendida, la suspensión y los sistemas de dirección y frenado. También dependen de las condiciones de uso, como la velocidad, carga y tipo de tren, y las condiciones de conexión entre las ruedas y la vía o su perfil. Además, estos esfuerzos también dependen de los defectos existentes en las ruedas, como defectos de fabricación, ovalización, diferencias de diámetro entre ruedas de un mismo eje, etc.

3.7 TIPOS DE DAÑO EN RUEDA

Los esfuerzos mencionados anteriormente pueden dañar el material de la rueda, lo que puede ser muy peligroso para la seguridad ferroviaria en algunos casos [6]. Los principales tipos de daños en las ruedas se dividen en:

3.7.1 Desgaste

El daño resultante está relacionado con el mecanismo de desgaste que provoca cambios en el perfil de la rueda.

3.7.1.1 Desgaste en la banda de rodadura

“HollowWear” (HW) es el término para el desgaste en el centro de la banda de rodadura. Este efecto de desgaste concentrado suele deberse al uso de bogies muy estables, que se desplazan principalmente por rutas muy rectas. La interacción entre la zapata de freno y la banda de rodadura, dependiendo de su estructura y selección de material, acelerará el desarrollo de este desgaste (ver Figura 13).

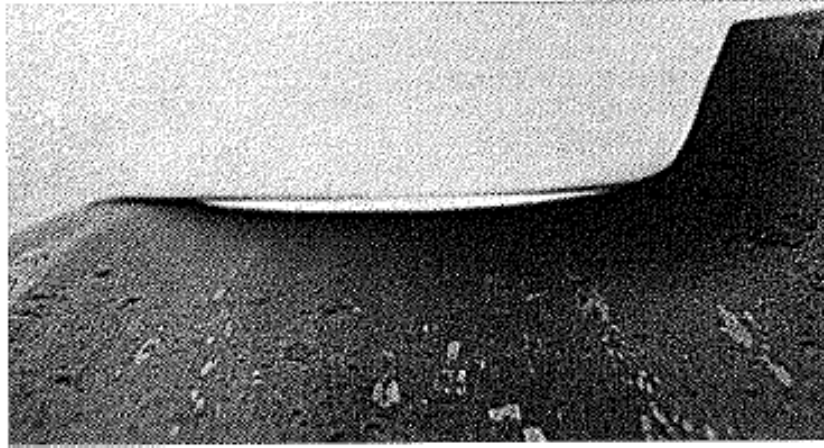


FIGURA 13 "HollowWear." FUENTE: [25], pág. 105

El desarrollo de este desgaste afecta la conicidad efectiva del eje instalado. Si el desgaste aumenta, afectará los límites de potencia y estabilidad del vehículo en algunos casos.

Si este desgaste es muy notorio en el centro de la banda de rodadura, puede conducir al desarrollo de los llamados "falsos rebordes". No solo afectará la formación de pestañas postizas en la dinámica del vehículo, sino que tampoco se recomienda que aparezcan como pestañas postizas, ya que dañará gravemente la cabeza del carril y los giros e intersecciones.

El desgaste en los primeros kilómetros de la vida útil de la rueda es uniforme a lo largo de la banda de rodadura y, posteriormente, cambia y se distribuye más en las dos áreas cercanas a la pestaña y el otro extremo de la pestaña. Este desgaste se debe principalmente a la resistencia que actúa sobre la banda de rodadura cuando la pestaña de la rueda opuesta entra en contacto con la pista.

Las características de la rueda y el carril son casi iguales entre sí, por lo que el esfuerzo cortante máximo en la rueda y la pista será similar.

El desgaste de las ruedas y el carril depende de la dureza del material y suele ser muy lento, en promedio de 1,5 a 3 mm por 100.000 kilómetros [17]. El aumento de la velocidad del tren conduce a un mayor desgaste y tensión

3.7.1.2 Desgaste de la pestaña

El desgaste de la pestaña afectará la superficie de la pestaña y la parte posterior de la misma. Se trata de fisuras axialmente progresivas que pueden afectar a una o más zonas de esta.

Estos tipos de grietas pueden ser de origen térmico o mecánico. Si es una fuente de calor, estas grietas aparecen debido al fuerte rozamiento de las zapatas de freno en la brida, que se debe al uso de zapatas de freno con geometría inadecuada. Si se trata de una grieta mecánica, la grieta se debe a un trazado deficiente de la vía (Figura 14) y la presión entre la brida y el riel es anormal.

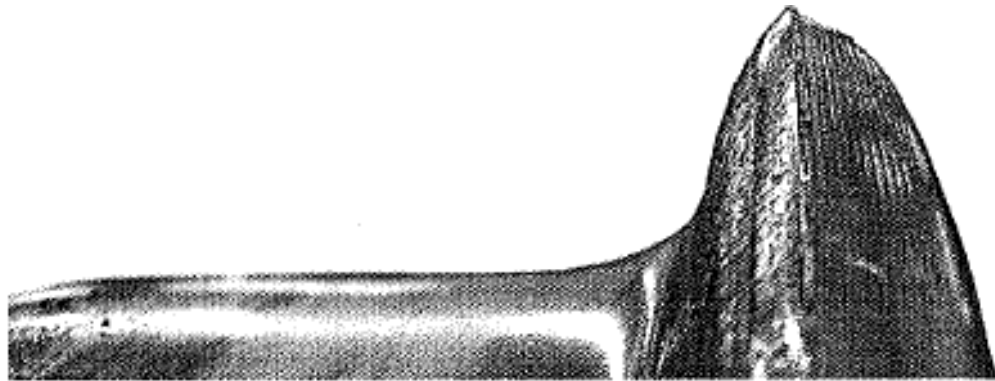


FIGURA 14 DESGASTE MODERADO EN LA CARA DE LA PESTAÑA. FUENTE: [25], pág. 109

El desgaste de la superficie de la pestaña suele verse afectado por la curvatura de la carretera, la infraestructura y las características del bogie.

También se sabe que el alto desgaste de la superficie de la pestaña es causado por piezas con un juego muy limitado (es decir, muy apretado). Si la cara está muy desgastada, se observa menos desgaste en la carretera por la que circulan estas ruedas.

Si hay diferencias significativas en el desgaste de la pestaña entre los diferentes lados del vehículo, generalmente indica la presencia de un perfil. El desgaste diagonal asimétrico del bogie también puede indicar que esto es el resultado de un arranque incorrecto del vehículo.

Dentro de los primeros 500 kilómetros, el desgaste de la pestaña será más grave y, después de eso, el desgaste disminuirá. El mayor desgaste inicial se debe a que el nuevo perfil entra en contacto con el carril guía en un área más pequeña, lo que soporta un valor de presión más alto y por lo tanto tiene una alta fricción.

3.7.2 Fatiga

La fatiga se puede definir como la acumulación de daños causados por la aplicación continua de cargas periódicas.

3.7.2.1 “Rolling Contact Fatigue”

RCF es un término que da daño relativo por fatiga, además de la fuerza de contacto vertical rueda-carril que actúa sobre la misma área de la rueda, también es causada por la acción repetida de la resistencia sintética.

Los repetidos ciclos de carga y descarga en la llanta y la fuerza de deslizamiento adicional provocan la deformación plástica del material a través de un proceso llamado "ratchetting".

Una vez que se excede la ductilidad del material debido al aumento de la deformación plástica, la grieta comenzará y se expandirá debido a los ciclos de carga repetidos en la dirección paralela al plano de deformación del material en el material. Una vez que la grieta alcanza un cierto tamaño, debido a la presión hidrostática que ejercen algunos fluidos, estos fluidos entrarán en las grietas de la banda de rodadura o de la cabeza del carril, y estarán atados por la rotación de las ruedas a lo largo del carril.

En algunos casos, la red de fisuras puede haberse desarrollado lo suficiente como para producir "shelling", un término utilizado para el proceso de pérdida de material de la banda de rodadura después de que se establece la red de fisuras por fatiga.

A medida que la grieta se propaga más en la banda de rodadura, su alineación cambiará lentamente desde su ángulo tangencial inicial y comenzará a adoptar una alineación más radial.

Debido a las diferencias longitudinales y fuerzas laterales existentes en cada área de la superficie de la rueda, se han obtenido cuatro clasificaciones RCF relacionadas con la posición; estas cuatro clasificaciones son: el área 1 se usa para la banda de rodadura y el área 2 para interacción de la rueda en su zona más cercana a la pestaña con el carril exterior de la curva, el área 3 es para el diámetro de la rueda dentro del bogie y el área 4 es para el eje (ver Figura 16).

Dado que las fuerzas de reacción de la presión de contacto y la fuerza de deslizamiento involucradas, el daño del RCF puede afectar las ruedas y las orugas. Sin embargo, el efecto será diferente debido a la diferente dirección y la cantidad de fuerza generada.

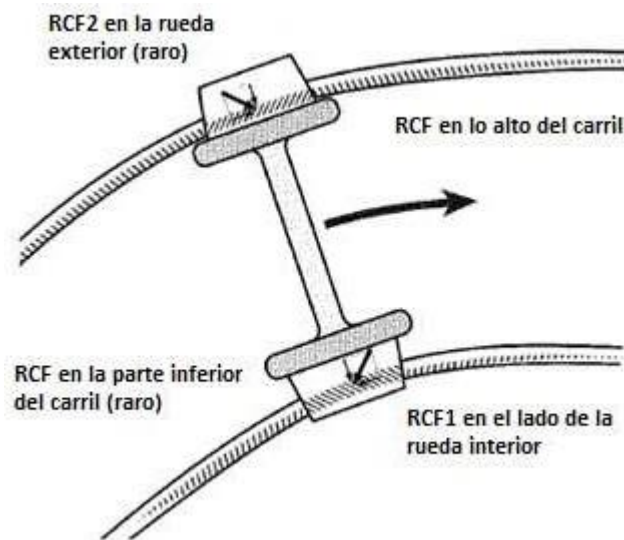


FIGURA 16 DESARROLLO DE RCF DENTRO DE UNA CURVA
FUENTE: [25], pág. 110

3.7.2.2 Fatiga subsuperficial

Este tipo de daño en la rueda puede ocurrir en casos raros, pero puede causar la pérdida de parte de la llanta.

Las grietas por fatiga superficial generalmente son causadas por materias extrañas, escoria o pérdida de uniformidad metalúrgica del material en la llanta. A medida que la rueda se acerca a su límite de desgaste, aumenta la tensión en la rueda. Junto con el aumento acumulativo de la carga cíclica, la pérdida de cierta uniformidad dentro del material se convertirá en el punto de partida de las fisuras por fatiga.

Con el desarrollo de ruedas de acero libres de polvo, el proceso de inspección de ruedas ultrasónicas y la mejora del sistema de pulido de vías para controlar los raíles corrugados, los ejemplos de grietas por fatiga subterráneas están disminuyendo, pero la falta de uso de acero de alta calidad para ruedas de ferrocarril seguirá causar tal daño. Es debido a inclusiones.

Antes de que tales grietas alcancen el área de la superficie de la banda de rodadura, las grietas subterráneas solo se pueden detectar en uso utilizando métodos de prueba volumétricos no destructivos (como pruebas ultrasónicas). Aunque una vez que las grietas subterráneas se han extendido lo suficiente como para alcanzar la superficie de la llanta o la parte posterior de la pestaña, este tipo de grietas se pueden detectar a simple vista.

La consecuencia de la pérdida de un segmento de la banda de rodadura de la rueda debido al desarrollo completo de una fisura subsuperficial es peligrosa, ya que en ocasiones la pérdida del segmento puede incluir una sección de la pestaña lo cual puede incrementar de manera significativa el peligro por descarrilamiento cuando existen en el recorrido curvas cerradas, desvíos o cruces.

Las consecuencias de la pérdida de la parte de la banda de rodadura debido al desarrollo completo de la grieta debajo de la superficie son peligrosas, porque a veces la pérdida de esta parte incluirá parte de la pestaña, lo que aumentará significativamente el riesgo de descarrilamiento cuando existe una curva, desvío o intersección en la ruta.



FIGURA 17 FISURA POR FATIGA SUBSUPERFICIAL QUE CAUSA LA PÉRDIDA DE UNA SECCIÓN DE LA PESTAÑA, ASÍ COMO DE LA BANDA DE RODADURA FUENTE: [25], pág. 115

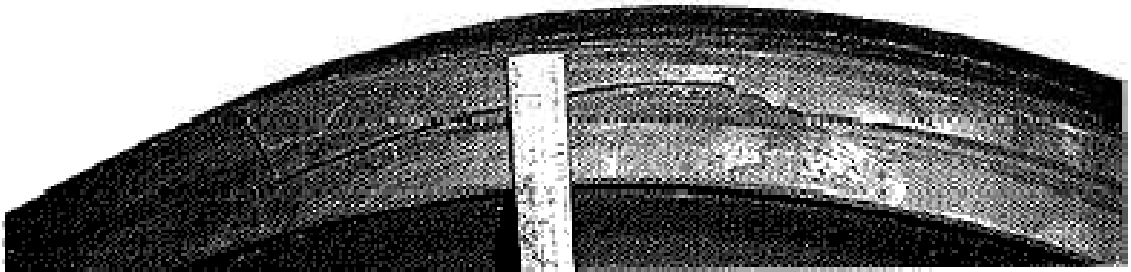


FIGURA 18 FISURA POR FATIGA SUBSUPERFICIAL QUE SE HA PROPAGADO SOBRE LA CARA DE LA LLANTA. FUENTE: [25], pág. 115



FIGURA 19 PÉRDIDA DE MATERIAL EN UNA ZONA DE LA BANDA DE RODADURA DEBIDO A UNA FISURA SUBSUPERFICIAL. FUENTE: [23], pág. 39

3.7.2.3 Defectos en el velo

Son fisuras circunferenciales debidas a la fatiga de la zona del defecto. Este tipo de fisura afectará a todo el espesor del velo y logrará una gran expansión circunferencial, e incluso provocará que la rueda se rompa repentinamente. Estas áreas defectuosas pueden ser defectos metalúrgicos, forjados o pliegues laminados, etc. Pueden producir grietas bajo el enorme estrés de reemplazo que soporta el velo. También se pueden producir por mecanizado de muescas o diseños incorrectos (piezas delgadas, orificios de equilibrio, radios cerrados o zonas con alta rugosidad).

La tensión en uso (como la tensión provocada por la flexión) provocará fatiga en la banda. El número de ciclos de carga puede ser aproximadamente 10^9 antes de que la rueda se desgaste al tamaño mínimo aceptable. Desde el punto de vista de la fatiga, el momento más peligroso es pasar una curva con un radio menor a máxima velocidad.

El área de transición entre la llanta y el alma es un área peligrosa, en la que momentos de flexión alternos pueden causar grietas por fatiga dentro de la rueda. Otra área peligrosa es el área de la telaraña cerca del eje, donde la resistencia a la fractura de toda la rueda es la más pequeña.

El desarrollo de fisuras se asocia a las altas tensiones a tracción generadas tras frenadas prolongadas y bajo la acción de altas cargas verticales y laterales.

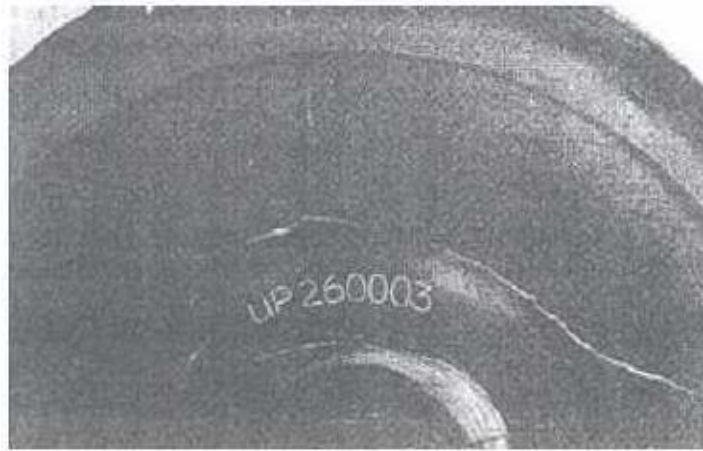


FIGURA 20 FISURA CIRCUNFERENCIAL DESARROLLADA EN EL VELO DE UNA RUEDA. FUENTE: [23], pág. 33

3.7.2.4 Defectos en el cubo

Por lo general, corresponden a defectos internos o grietas que se expanden axialmente causadas por un apriete excesivo durante las operaciones de instalación. Este tipo de defecto no es muy común.

3.7.3 Deformación

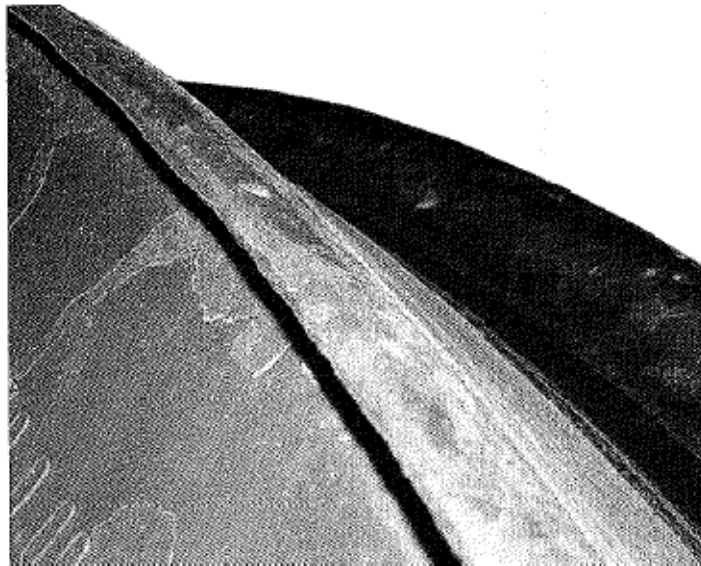
La alta presión de contacto, la fuerza de arrastre y / o el material irregular pueden causar deformación del material, que puede distribuirse por la banda de rodadura o en varios puntos.

3.7.3.1 Deformación lateral en la barra de rodadura

Este tipo de daño por deformación lateral puede causar un reborde sobresaliente en la parte biselada de la superficie de la rueda.

La cantidad permitida de deformación lateral generalmente se indica en el manual de mantenimiento del vehículo. Permite que un cierto grado de deformación sea diferente en mosquiteras y vehículos. Las locomotoras generalmente sufren tales daños con más frecuencia que otros tipos de vehículos de la red principal. Esto se debe a la locomotora. Con sus ejes muy cargados, generalmente ejercen una gran tracción al conducir por esquinas estrechas.

En algunos casos, después de que la llanta se deforma lateralmente, pueden aparecer abolladuras en el área de la banda de rodadura o la deformación puede hacer que el chaflán se mueva lateralmente.



*FIGURA 21 DEFORMACIÓN LATERAL EN LA BARRA DE RODADURA.
FUENTE: [23], pág. 39*

3.7.3.2 Colapso local de la banda de rodadura

Este tipo de daño local puede provocar deformaciones laterales de la rueda y pérdida de la circularidad. El resultado de la medición del radio de la rueda se reducirá y la longitud puede reducirse en un milímetro. La detección de este tipo de daños se consigue activando una señal basada en el sensor de carga de la rueda, que refleja la sobrecarga vertical entregada a la vía.

Este tipo de daño es el mismo que el RCF, se manifiesta como un fenómeno único en una sola rueda y puede ocurrir sin martensita u otros tipos de daño térmico. Después de ser dañado por la deformación plástica lateral, la red de grietas se desarrollará hacia el centro de la banda de rodadura, lo que puede hacer que el material se caiga y forme una cavidad local en la rueda.

3.7.3.3 Planos de rueda

Los planos de la rueda (Wheelflats) puede ser la forma más clásica de daño. Este fenómeno se produce cuando el vehículo sigue en marcha cuando el bogie está total o parcialmente bloqueado y hace que deslice. Esto crea un alto nivel de deslizamiento (la diferencia entre la velocidad de rotación de la circunferencia de la rueda y la velocidad lineal del vehículo) entre la rueda fija o cuasi fija y la pista.

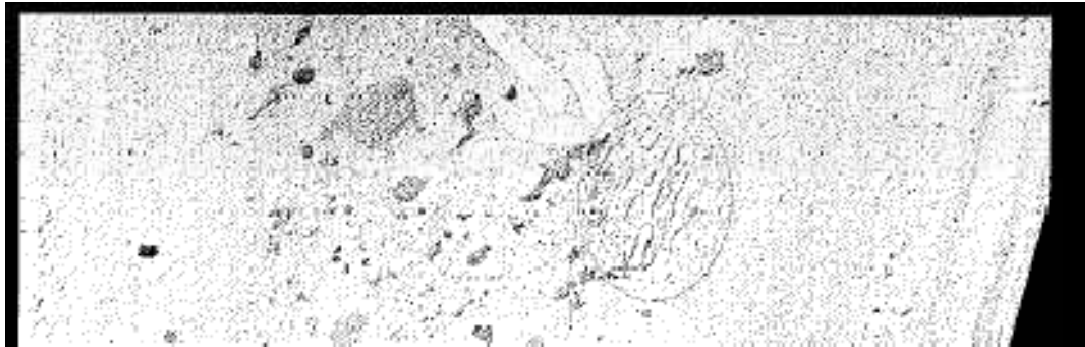


FIGURA 22 VISTA CERCANA DEL PLANO EN LA RUEDA POR DONDE LAS FISURAS SE HAN INICIADO DENTRO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR. FUENTE [23], pág. 36

Un error común es que el daño al plano de la rueda es causado por la acción abrasiva de la rueda, porque la rueda se desliza a lo largo de la cabeza de la pista. Sin embargo, el daño térmico causado por una gran cantidad de entrada de calor causada por el deslizamiento es la causa de la mayoría de los daños. Aunque a veces se produce un pequeño desgaste mecánico, una vez que se produce el calentamiento, ya está incluido en la parte deformada. La superficie plana es formada por el neumático, resultado de la deformación de la superficie.

Debido al deslizamiento de la rueda sobre la pista, el rozamiento resultante calentará localmente las partes en contacto con la rueda, que pueden alcanzar una temperatura elevada (800°-850°C), lo que transforma el material de la rueda de acero perlita en austenítico necesario para el cuerpo. Dado que la parte de contacto de la rueda se enfría rápidamente después de que se detiene el deslizamiento, especialmente una vez que la rueda comienza a girar de nuevo y entra en contacto con el extremo frío del riel guía nuevamente, debido a este enfriamiento rápido, la austenita se transforma en martensita.

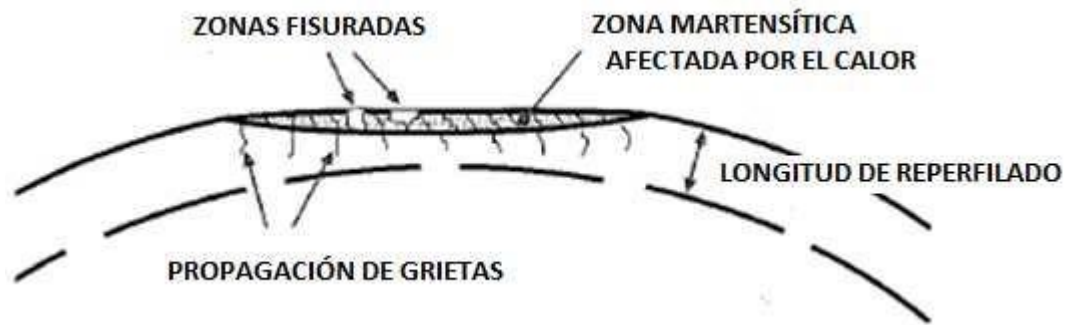


FIGURA 23 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA SECCIÓN DE CORTE DE UN PLANO DE RUEDA. FUENTE [23], pág. 19



FIGURA 24 PLANO DE RUEDA POR EL BLOQUEO DEL EJE QUE HA COMENZADO A FISURARSE SUPERFICIALMENTE. FUENTE [23], pág. 54

Debido a los ciclos de carga mecánica adicionales aplicados al área de contacto, se generaron grietas en la zona afectada por el calor. Se difunden hasta que el área de acero martensítico endurecido afectada por el calor comienza a pelarse, dejando una cavidad en la banda de rodadura. Estas cavidades pueden generar cargas mecánicas debido a golpes y causar grandes pérdidas radiales asociadas con la llanta. A veces, la red de grietas se extiende al material circundante debajo de la zona afectada por el calor.

Aunque debe tenerse en cuenta la profundidad de corte necesaria para eliminar todo el material, la planitud de la llanta puede desaparecer. Afectado por el calor y todas las redes de grietas restantes ubicadas debajo de la capa de martensita.



FIGURA 25 PLANO DE RUEDA. FUENTE [23], pág. 55



*FIGURA 26 PLANO DE
RUEDA CON
DESPRENDIMIENTO.
FUENTE [23], pág. 58*

3.7.3.4 Deformación de la punta de la pestaña

Las irregularidades de los perfiles y los objetos extraños y los carriles guía ranurados también pueden provocar un aumento de la presión de contacto en el extremo de la pestaña, lo que conduce a la deformación plástica de la pestaña. Pueden ser causados por cargas repetidas o colisiones de los extremos de las pestañas. La remodelación de la banda de rodadura del neumático puede restaurar el estado de las ruedas y las pestañas, aunque se deben tomar otras medidas para evitar que esto vuelva a suceder.

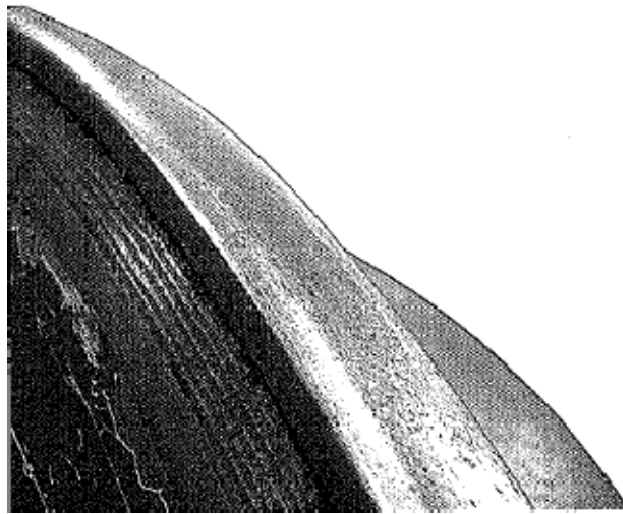


FIGURA 27 PESTAÑA CON CHOQUES EN SU EXTREMO. FUENTE [23], pág. 69

3.7.3.5 Desprendimiento en la pestaña

Generalmente, esto se debe a la presencia de una mayor presión de contacto cuando la rueda está en contacto con el rail, que tiene una parte de corte que interactúa con la pestaña. En principio, la parte cortada de la pista debe estar a una altura que garantice que no hay interacción con la pestaña, pero debido a que la cabeza de la rueda y la pista pueden estar desgastadas, la parte cortada estará cerca de la pestaña. También se forma cuando la punta de la brida circula en una vía ranurada (especialmente tranvías en intersecciones y giros) Hay irregularidades locales u objetos extraños en la ranura, dando como resultado la parte inferior de la brida La presión de contacto aumenta.

El reperfilado de la banda de rodadura de la rueda restaura la rueda y las condiciones de la pestaña, aunque se deben tomar otras medidas para evitar que tales daños se repitan.

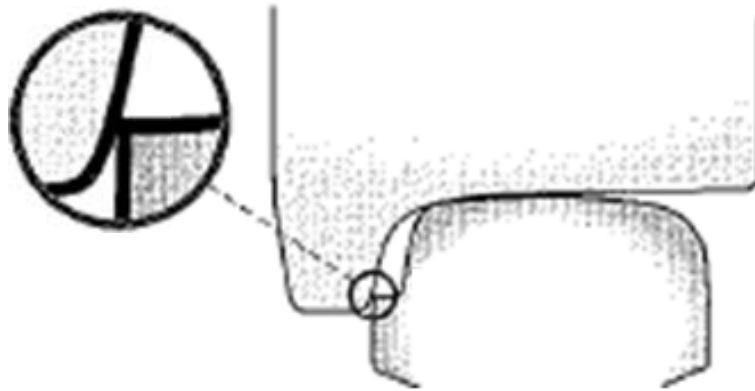


FIGURA 28 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA INTERACCIÓN DE LA PARTE ALTA DE LA PESTAÑA CON UN CARRIL QUE TIENE UN NIVEL SIGNIFICATIVO DE PARTE CORTANTE FUENTE: [17], pág. 39

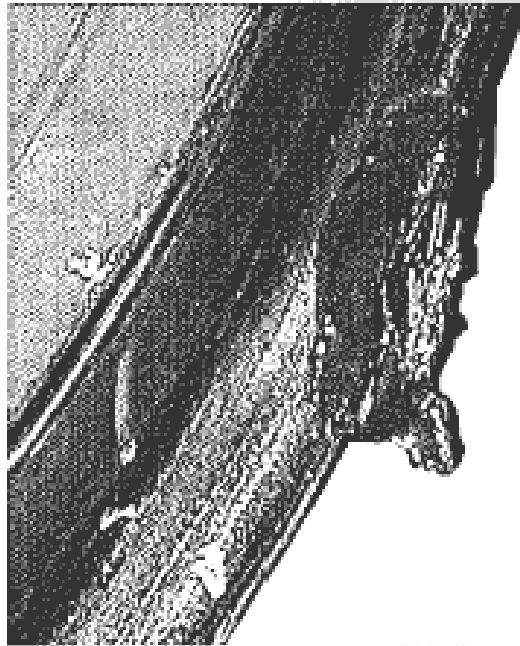


FIGURA 29 DESPRENDIMIENTO DE LA PESTAÑA.
FUENTE [23], pág. 49

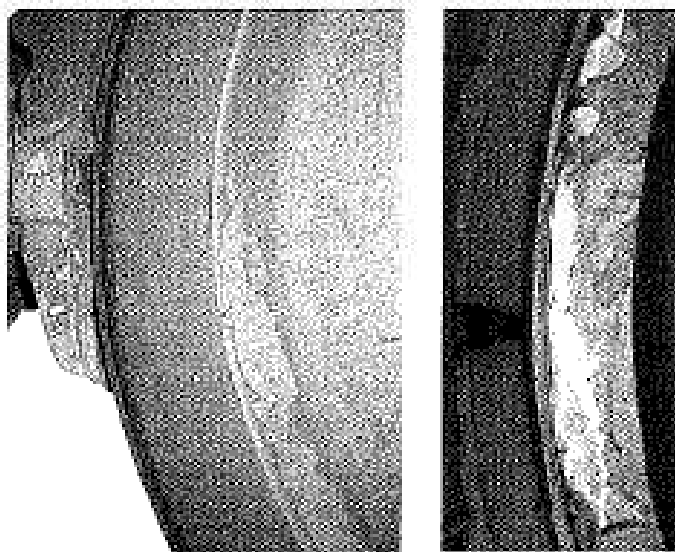
3.7.4 Térmico

La carga térmica generada por el frenado, ya sea el deslizamiento del eje de montaje o el calor generado durante el bloqueo de las ruedas, puede causar muchos tipos de daños.

3.7.4.1 Sobrecarga térmica

En un vehículo que utiliza una banda de rodadura para frenar el vehículo, debido a la conversión de energía cinética en energía térmica, se transfiere una gran cantidad de calor desde la llanta al interior de la rueda. El arrastre de las zapatas, el frenado prolongado u otras acciones inadecuadas pueden afectar la integridad de la banda de rodadura; la rueda puede calentarse para exceder su capacidad térmica diseñada y por lo tanto sufrir una sobrecarga térmica.

El efecto visual de la sobrecarga térmica es la decoloración de la pintura de la llanta y la decoloración del acero de la rueda a lo largo de la superficie de la llanta en la banda de rodadura. Como resultado, si la temperatura y la duración del sobrecalentamiento son demasiado largas, cambiará el signo de la tensión residual de compresión presente en la llanta y / o la aparición de grietas transversales en la banda de rodadura.

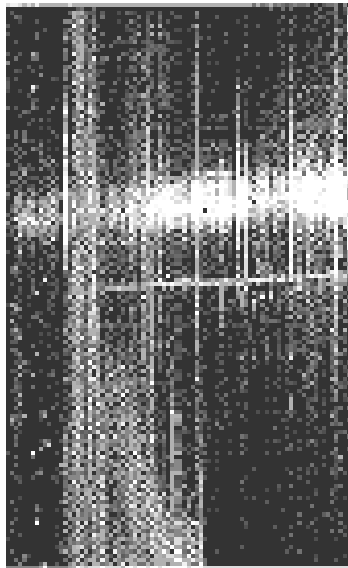


*FIGURA 30 RUEDA QUE HA SUFRIDO UNA SOBRECARGA TÉRMICA.
FUENTE [23], pág. 32*

3.7.4.2 Fisuras térmicas laterales

Tras la sobrecarga térmica provocada por la acción de frenado, la banda de rodadura producirá fisuras térmicas transversales. La presencia de fisuras térmicas laterales es un factor importante de seguridad, ya que estas fisuras pueden extenderse lateral y radialmente a través de la llanta y hacia los radios. En casos extremos, pueden ocurrir fallas catastróficas debido a cargas mecánicas y térmicas aplicadas después del inicio de la fisura. El desarrollo de fisuras térmicas transversales puede (pero no

necesariamente) indicar que la tensión residual protectora de la llanta ha alcanzado Se ha neutralizado o cambiado la señal debido a un sobrecalentamiento anterior de la rueda.



*FIGURA 31 FISURA LATERAL
TÉRMICA [17], pág. 39*



FIGURA 32 LLANTA FISURADA TRAS UN SOBRECALENTAMIENTO. FUENTE [23], pág. 35

La aparición de fisuras térmicas transversales depende no solo de la temperatura de la superficie de la banda de rodadura alcanzada, sino también del gradiente térmico y la duración existente en la llanta.

3.7.5 Infraestructura

El ferrocarril moderno es un sistema con una interacción clave entre las ruedas y el ferrocarril. Por tanto, existe una serie de daños que dependen de la infraestructura y del crítico sistema de interacción rueda-carril.

3.7.5.1 Marcas en la banda de rodadura

Las ranuras o marcas en la banda de rodadura son causadas por objetos extraños en el cabezal de la oruga (consulte la Figura 33).

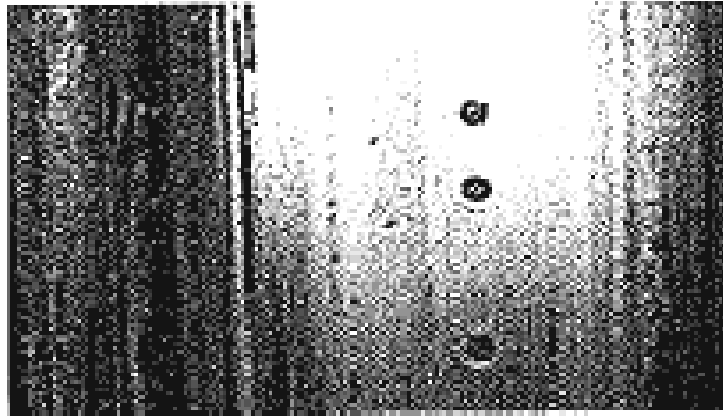


FIGURA 33 MARCAS DEBIDAS A CUERPOS EXTRAÑOS PRESENTES EN EL CARRIL. FUENTE [23], pág. 38

En la mayoría de los casos, este daño sólo afecta al aspecto de la rueda, aunque si se superan los límites especificados en el manual de mantenimiento, se debe afilar la rueda afectada.

Las partículas de arena utilizadas para mejorar la tracción o el frenado en el sistema de control de arena del vehículo también producirán estas marcas en la banda de rodadura. Por tanto, el tamaño del marcador será proporcional al tamaño de la arena utilizada en la red correspondiente (ver Figura 34).



FIGURA 34 MARCAS DEBIDAS A ARENA. FUENTE [23], pág. 45

3.8 MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO EN RUEDA

Como se mencionó anteriormente, las grietas están presentes en la mayoría de los defectos que ocurren. Básicamente, estas grietas en las ruedas son importantes debido a tres factores: seguridad, comodidad y consumo de llanta.

Las grietas son causadas por defectos, que se pueden dividir en dos tipos:

- a) Defectos provocados por la fabricación
- b) Los defectos generados durante el mantenimiento deben observarse durante los trabajos de mantenimiento. Suelen ser fisuras por fatiga, defectos de corrosión o una mezcla de ambos

Las fisuras crecen básicamente por estrés mecánico (esfuerzo cortante), y el estrés térmico juega un papel importante en el crecimiento de su nucleación hasta alcanzar el umbral y la generación de estrés residual.

Para controlar estrictamente las grietas de las ruedas de ferrocarril, se deben determinar los siguientes puntos:

1. Los tipos de defectos que pueden ocurrir y su ubicación. Uno de los principales problemas que surge es la detección de áreas donde pueden ocurrir grietas por los defectos. La principal dificultad es que hay Las grietas pueden ocurrir en muchos lugares y también dependen de muchos factores.

2. Modo de fallo esperado.

3. Vida útil a partir de la detección de una fisura.

4. Si el resultado del fallo será catastrófico o simplemente producirá pérdidas económicas (necesidad de reperfilar la rueda).

5. Dependiendo del tamaño crítico de la grieta de la falla, causará la falla. No existe un estándar para definir el tamaño mínimo permitido. Existen normativas que especifican el tamaño y la ubicación de los defectos graves en las ruedas nuevas (después de la fabricación). Hay muchos estudios que intentan calcular este tamaño crítico de grieta, pero de acuerdo con muchas situaciones, es difícil desarrollar un estándar que sea siempre válido.

6. El número de inspecciones realizadas durante la vida útil de la muela. Las ruedas que son más propensas a agrietarse son ruedas que se sobrecalientan debido al frenado prolongado, porque la fuerza de compresión residual obtenida después del tratamiento térmico en el proceso de fabricación se convertirá en tensión de tracción, lo que ayuda a la generación de grietas y propagación de la fuerza de tracción.

Entre todos los defectos detectados en las ruedas de ferrocarril, destacan las fisuras que pueden existir a distintas profundidades de la banda de rodadura (como superficial, subterránea e interna).

3.8.1 Fisuras superficiales “Spalling”

Son fisuras que se propagan al interior de la llanta creando una pequeña separación de material. Estas grietas son provocadas por el deslizamiento de la rueda o la acumulación de deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura.

- Producidas por deslizamiento de ruedas:

El rozamiento entre rueda y carril provocará una alta carga térmica local en la banda de rodadura, con una temperatura cercana a los 800°C. A esta temperatura El límite elástico de esta zona se reduce y pueden producirse deformaciones plásticas. Cuando la rueda gira nuevamente, se enfría rápidamente, lo que provoca un cambio de fase en la banda de rodadura para formar martensita. Esto crea tensiones residuales de compresión en la estructura martensítica y tensiones residuales de tracción en los

materiales circundantes. Si la muela todavía está en uso, o la zona afectada por el calor no se procesa, se formarán grietas por fatiga bajo la acción de la tensión de contacto de rodadura. La resistencia a la propagación de la grieta en la martensita es casi nula, pero no es seguro si la grieta continuará propagándose una vez que la grieta entre en el material base. La deformación de la superficie y la formación de grietas ocurren en el área de contacto entre la pequeña capa de martensita y el área circundante de perlita. A medida que las ruedas se mueven, se fomenta el desarrollo de grietas.

Una vez que la grieta se propaga, una pequeña parte del material se separará, lo que hará que el nivel de impacto continúe aumentando (ver Figura 35) [25].



FIGURA 35 DESPRENDIMIENTO EN LA BANDA DE RODADURA PRODUCIDO POR "SPALLING". FUENTE [23], pág. 40

- Producidas por deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura (*rachetting*):

Cuando la carga supera el límite elástico de la rueda, se produce un flujo de plástico, que genera tensión residual y endurece el material por deformación. La falla es causada por ciclos de fatiga de baja frecuencia. Este fenómeno ocurre cerca de la superficie de trabajo. La razón principal es la alta fricción.

Cuando se agota la ductilidad de la superficie del material, las grietas generalmente se forman perpendiculares a la dirección de deslizamiento. La deformación produce grietas, que parten del material y se propagan a lo largo de los granos deformados plásticamente, inicialmente en un ángulo poco profundo en la superficie, y se propagan a lo largo de la dirección axial. Con el tiempo, tienden a desviarse en la dirección circunferencial y, finalmente, se produce la fractura cuando una parte de la grieta alcanza la superficie, lo que hace que una parte de la banda de rodadura se desprenda.

3.8.2 Exfoliaciones "Shelling"

La rotura de la banda de rodadura por fatiga, producida por el defecto conocido como "shelling", es uno de los defectos de ruedas más comunes. Este defecto está asociado a altas cargas y bajos niveles de deslizamiento, produciéndose la pérdida de material causada por RCF. Durante el ciclo de contacto el daño subsuperficial se acumula dando lugar a pequeñas grietas horizontales. Bajo ciclos de carga estas grietas se propagan bajo la superficie hasta que el campo de tensiones hace que la grieta cambie de dirección hacia la superficie.

La fractura por fatiga de la banda de rodadura causada por un defecto llamado "shelling" es uno de los defectos más comunes de las ruedas. Este defecto está relacionado con una carga alta y un nivel bajo de deslizamiento, lo que resulta en una pérdida de material causada por el RCF. Durante el ciclo de contacto, se acumularán daños subsuperficiales, lo que provocará grietas horizontales más pequeñas. Bajo ciclos de carga, estas grietas se propagan debajo de la superficie hasta que el campo de tensión cambia la dirección de la grieta hacia la superficie.

Se caracteriza por una forma de anillo paralela a la superficie de rodadura. Estos son defectos causados por fatiga y crecimiento de grietas cerca de la banda de rodadura, y la profundidad es de unos pocos milímetros, unos 6 mm [26]. Suponiendo que la fisura comienza a una profundidad entre 4 y 5 mm [24], se propaga a una profundidad de aproximadamente 20 mm, se desvía de esta profundidad en la fisura circunferencial y se observa una fisura entre 15 y 30 mm antes de que el material se rompa.

El proceso depende del material y las condiciones de operación, pero en todos los casos, su manifestación es la generación y propagación de grietas en la capa cercana a la superficie, formando una separación que produce agujeros. La aparición de grietas por fatiga está relacionada con la deformación cíclica local y la deformación plástica. Una vez que se forman las grietas, se expandirán rápidamente a la profundidad del esfuerzo de contacto de corte máximo, aparentemente paralelo a la superficie.

Este tipo de defecto puede ser muy peligroso porque produce fisuras que se expanden en la dirección circunferencial y pueden separar piezas. Material importante. Las malas condiciones de la vía, la carga y velocidad excesivas, la dureza insuficiente de las ruedas y las ruedas demasiado pequeñas para soportar la carga son factores que forman el "shelling". Este tipo de daño ocurre principalmente en las ruedas que son

frenadas por los discos de freno.

Las ruedas con "shelling" y "spalling" estarán sujetas a mayores cargas de impacto. Esto se debe a que la detonación de la rueda ovalada acelerará la generación y propagación de grietas, y también dañará diferentes partes del tren como cojinetes o suspensiones.

3.8.3 Inclusiones profundas "Shattering"

Este modo de falla generalmente es causado por inclusiones internas ubicadas en áreas de contacto de alta tensión, que pueden conducir a la pérdida de material en la llanta y la brida. Estos defectos provocan un aumento local en la altura de la tensión y la deformación.

En la práctica, no hay material sin defectos y su efecto depende de su tamaño, forma y dirección. Las inclusiones de alúmina en las ruedas forjadas pueden causar grietas. Las inclusiones de alúmina pueden tener múltiples fuentes, productos de desoxidación que no desaparecen durante el proceso de fusión y no se reoxidan durante la colada de lingotes o bloques de material cerámico de un horno o cucharón refractario.

En lo que respecta a los proveedores de ruedas, la pureza del acero utilizado en los ferrocarriles ha sido uno de los avances significativos, especialmente con el aumento de la velocidad en Europa. Combina la medición de la pureza y muchos métodos de prueba no destructivos para evitar que las ruedas se rompan durante el uso. Después del tratamiento térmico y el mecanizado de la rueda, se realizan mediciones de pureza y pruebas no destructivas.

Estos defectos generalmente se propagan paralelos a la banda de rodadura hacia el exterior del neumático, en lugar de hacia el interior de la rueda. Una vez que comienza la grieta, en condiciones normales de carga de la rueda, la grieta se extenderá rápidamente. Sin embargo, para que se inicie la grieta, es necesario generar una gran carga, como una fuerza de impacto.

La mayoría de las ruedas afectadas por este tipo de daños son ruedas relativamente nuevas, y hay algunas ruedas para elegir hacia el final de su vida útil.

Después de que uno o más se reperfilan y reutilizan, las grietas continuarán creciendo y evolucionarán hacia la destrucción "shattering". Esto explica por qué este

tipo de rueda averiada también aparece al final de su vida útil.



FIGURA 36 FALLO EN RUEDA POR "SHATTERING". FUENTE [23], pág. 76

3.8.4 Fisuras térmicas

Son grietas muy peligrosas para las ruedas, suelen ocurrir en los vagones de mercancías donde los frenos se aplican directamente a la banda de rodadura. Son causadas por un frenado anormal, la introducción de flujo de calor en un área pequeña de la llanta o la fricción de materiales que son corrosivos para el acero. Debido a los diferentes ciclos térmicos, estas fisuras se originan por fatiga.

Después de su origen, si existe un campo de esfuerzos de tracción, se propagarán en la dirección axial hasta el momento de la fractura frágil, momento en el que se producirá un crecimiento inestable de grietas, lo que provocará una falla catastrófica de la rueda. Otra posibilidad es que estas grietas se originen a partir de grietas axiales en la superficie y se desvíen hacia grietas circunferenciales bajo carga mecánica.

Para las ruedas europeas que son ruedas forjadas, es más probable que se produzcan grietas calientes en la banda de rodadura cerca de la superficie exterior. Sin embargo, para las llantas americanas (llantas fundidas), es más común encontrar este tipo de grietas cerca de la pestaña.

4. INSPECCIÓN DE RUEDAS FERROVIARIAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Obviamente, en los materiales, especialmente en el acero utilizado para ruedas de ferrocarril, es inevitable que haya defectos tanto en la macro como en la microescala. Estos defectos son inherentes al material o se producen durante el proceso de fabricación o durante su funcionamiento (como grietas por fatiga) **[10]**.

El problema que surge es que la confiabilidad del componente o su ciclo de vida a fatiga y otros factores dependen del tamaño de la grieta. Conocer el tamaño de la grieta no es fácil. Sin embargo, existen muchos métodos, cada uno de los cuales tiene sus limitaciones y complejidad. A veces no encontramos grietas. Esto no significa que no haya grietas, pero la resolución del equipo no es suficiente para detectar las grietas. En este caso En este caso, es necesario asumir la existencia de una fisura para los cálculos posteriores, y la longitud de la fisura será el valor mínimo que podrá medir el equipo en cuestión **[12]**.

En la situación actual, las pruebas no destructivas implican verificar el componente de una manera que no obstaculice su uso futuro. Aunque en la mayoría de los casos, las pruebas no destructivas no pueden medir directamente las propiedades mecánicas, son muy útiles para localizar defectos superficiales e internos (grietas, inclusiones, porosidad) en materiales que pueden afectar el desempeño del componente en uso.

Las ventajas más importantes de las pruebas no destructivas son **[13]**:

- Se lleva a cabo directamente sobre piezas fabricadas.
- Se puede aplicar al 100% de la producción o una pieza representativa.
- El ensayo se puede repetir o realizar otros ensayos sobre la misma pieza.
- Se puede realizar el ensayo sobre piezas en funcionamiento; controlando los efectos acumulados durante la vida en servicio
- Requiere una sencilla preparación de la muestra.
- El equipo es portátil.

Entre las limitaciones de los ensayos no destructivos se encuentran:

- Los resultados requieren un análisis por parte de trabajadores cualificados.
- Puede haber diferentes análisis realizados por diferentes especialistas.
- Las propiedades son analizadas comparativamente.
- Suele requerir una inversión grande de capital.

Existen muchos métodos de prueba no destructivos para ruedas de ferrocarril, y luego se estudiará cada método de prueba y se analizarán los métodos de prueba que están implementando actualmente las empresas ferroviarias más importantes.

4.2 INSPECCION VISUAL

Este es el método más fácil y siempre se usa cuando otros tipos de sistemas tienen indicaciones de falla. Incluso si se utilizan otras técnicas de detección de grietas, la inspección visual es una ayuda útil. Esta es la primera etapa de la inspección y suele ser un requisito básico para otras pruebas.

Puede detectar e inspeccionar varios defectos superficiales, tales como: soldaduras y uniones defectuosas, dimensiones incorrectas, ajustes incorrectos, componentes incompletos, acabados superficiales incorrectos, grietas, vacíos, rastros, etc.

Los métodos de inspección visual pueden incluir una variedad de equipos, desde la inspección visual en sí hasta el uso de un microscopio para medir el acabado de la superficie pulida y el uso de herramientas ópticas complementarias (lupa, foco, espejos, cámaras, etc.) [13].

4.3 ANALISIS ACÚSTICO

Este es un método utilizado desde la antigüedad. Si hay un golpe de martillo, el sonido de una rueda defectuosa es diferente del sonido de una rueda no defectuosa. La rueda debe estar excitada para poder vibrar y analizar el sonido obtenido, porque las discontinuidades (como grietas) que aparecen en la rueda provocarán diferentes modos de vibración, que producirán diferentes sonidos.

Este método debe distinguirse de la tecnología de vibración moderna, porque si bien se ha analizado la vibración, el propósito de este análisis es analizar el sonido producido por las ruedas.

4.4 PARTICULAS MAGNÉTICAS

De esta manera, las grietas superficiales o las grietas cercanas a la superficie se pueden encontrar y magnetizar en la dirección circunferencial. La prueba se basa en el principio de distorsión del campo magnético alrededor del defecto perpendicular a la dirección del campo magnético, lo que se denomina fuga de flujo.

Mediante el uso de partículas ferrosas aplicadas a la superficie se puede detectar la presencia de una disminución en la continuidad del campo magnético, lo que indica la existencia de defectos o defectos en el material. Estas partículas se acumularán cerca del área discontinua.

Esta acumulación nos permite observar la ubicación, tamaño, forma y grado de discontinuidades. Los materiales clasificados como ferromagnéticos incluyen hierro, níquel y cobalto, y muchos aceros inoxidables han sido magnéticos durante muchos años.

La ventaja de esta tecnología es que es simple y barata, puede detectar grietas de 1 micrón de ancho y es relativamente rápida en comparación con otras inspecciones. La limitación de esta tecnología es que la pieza debe ser ferromagnética y el material debe ser probado. Después de la prueba, la desmagnetización, debido a juntas con diferentes propiedades magnéticas, superficies rugosas y superficies cubiertas por capas no magnéticas también puede causar falsas alarmas.

El ensayo por partículas magnéticas puede ser realizado con partículas visibles o con partículas fluorescentes (ver Figura 37).

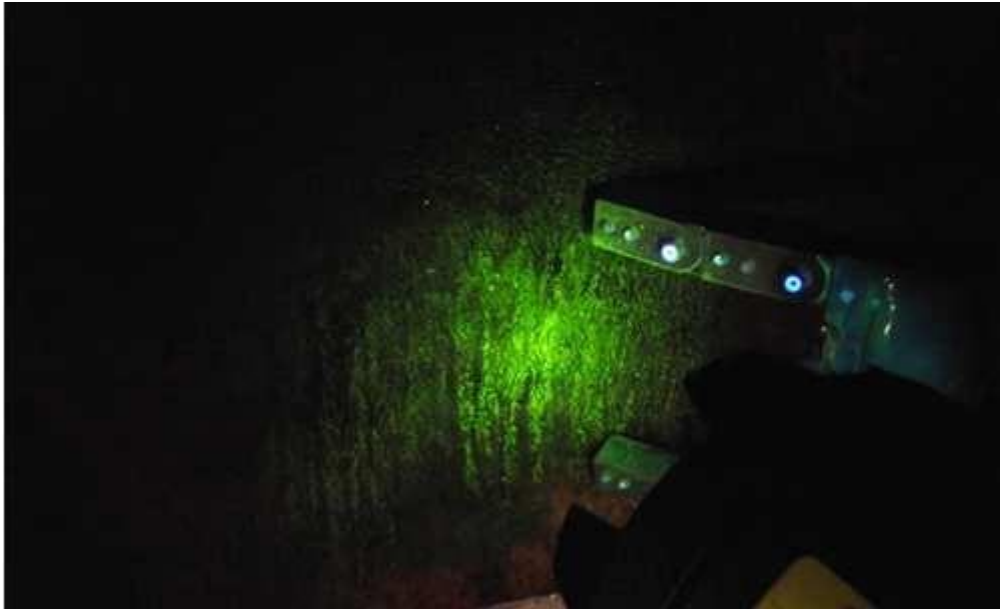


FIGURA 37 INSPECCIÓN CON PARTÍCULAS MAGNETICAS. FUENTE [23], pág. 85

4.5 LIQUIDOS PENETRANTES

Es un método utilizado para revelar discontinuidades en superficies sólidas o materiales sustancialmente no porosos. Independientemente de la configuración de las piezas o de la dirección de la falla, puede permitirle encontrar varias indicaciones de falla. El líquido penetra en la superficie de forma discontinua por capilaridad y actúa. Por lo tanto, el método es adecuado para todo tipo de fallas superficiales, como grietas, huecos, áreas de contracción, laminaciones y discontinuidades similares.

El equipo utilizado para estas prácticas puede variar desde simples tanques de tinta y desarrolladores hasta complejos sistemas informáticos. Sin embargo, establecer procedimientos y estándares de control es la clave para obtener los mejores resultados.

La limitación de este método es que solo permite la detección de grietas abiertas al exterior, además, superficies rugosas o porosas pueden interferir con la inspección, y recubrimientos, incrustaciones y contaminación también pueden enmascarar defectos.

La inspección de líquidos penetrantes requiere que se aplique un líquido

penetrante de color a la superficie a inspeccionar. Después de cierto tiempo de penetración, se debe retirar completamente de la superficie y luego se aplica un elemento revelador, cuya función es absorber el líquido de la discontinuidad y darle un contraste de color para hacerla visible. Este proceso implica mucho tiempo y energía [19].

Los líquidos penetrantes se clasifican en:

Según la solubilidad:

- *Penetrantes lavables con agua o autoemulsificables*: El agua solo se utiliza para limpiar y eliminar el exceso de agua. Son muy económicos de usar.
- *Penetrantes postemulsificables*: No son solubles en agua. Para eliminar los excesos superficiales se utilizan emulsionantes, que crean una capa superficial que se puede eliminar con agua. Este método puede obtener la mayor sensibilidad y el operador tiene el mayor grado de dominio de cada etapa. Existen dos tipos de emulsionantes: emulsionantes hidrófilos, a base de agua, que se utilizan en soluciones acuosas, y su saturación depende de las necesidades de la situación; lipófilos y aceitosos, proporcionados por el fabricante.
- *Penetrantes eliminables con disolvente*: También son insolubles en agua. Se utilizan disolventes no acuosos para eliminarlo y se denominan "depuradores". Son muy prácticos porque el disolvente suele entrar en forma de aerosol.

Según el color:

- *Penetrantes coloreados*: Se comprueba a simple vista. Todo lo que necesita es una buena fuente de luz blanca. Su sensibilidad es baja (ver Figura 38).
- *Penetrantes fluorescentes*: Si no son invisibles a simple vista, se verifica con la ayuda de lámparas ultravioleta (luz negra). Tienen mayor sensibilidad (ver Figura 38):

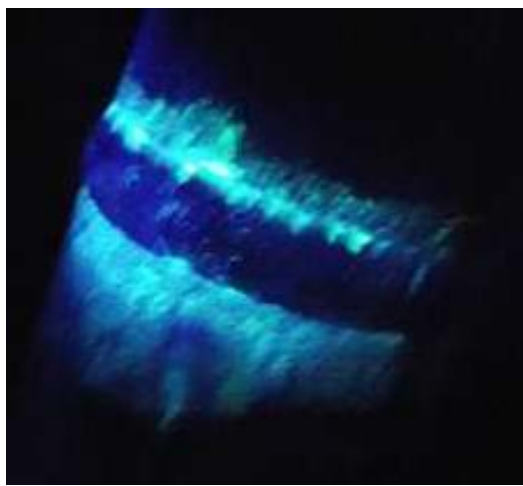


FIGURA 38 INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES (IZQ) Y FLUORESCENTE (DCHA). FUENTE [23], pág. 102

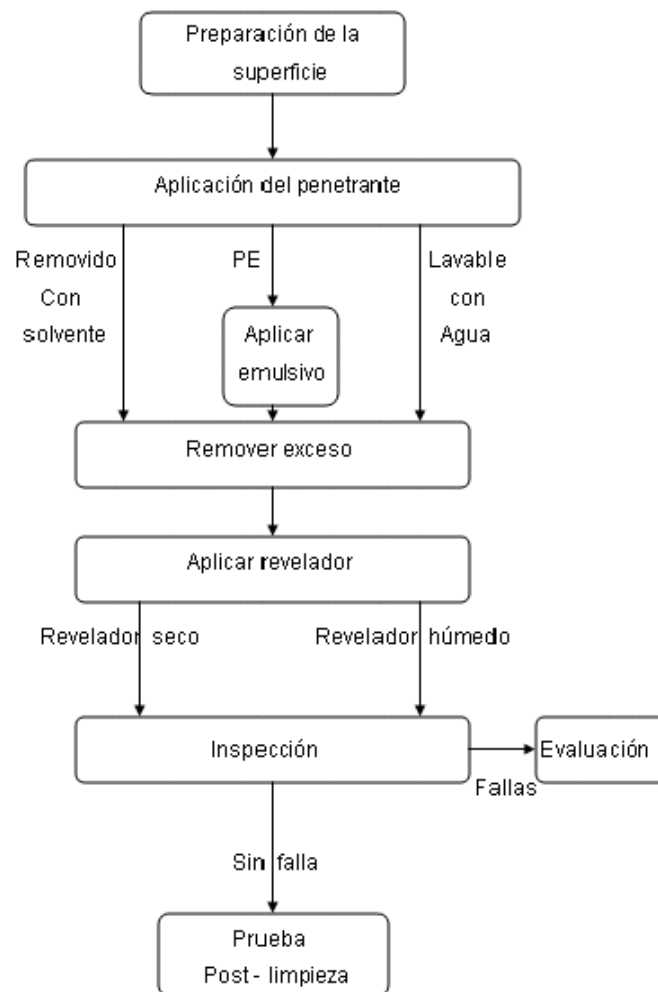


FIGURA 39 DIAGRAMA GENERAL DE LA APLICACIÓN DE LIQUIDOS PENETRANTES. FUENTE [22], pág. 75

4.6 TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS

Este tipo de pruebas son las más utilizadas en la actualidad y las que brindan los mejores resultados. Aunque los métodos de ultrasonido aún no están completamente estandarizados, todavía están evolucionando y mejorando.

4.6.1 Principios acústicos

4.6.1.1 Definiciones básicas

Para comprender mejor los fenómenos que ocurren en las pruebas ultrasónicas no destructivas, se estudiarán algunos conceptos físicos necesarios.

- **Oscilación:** Cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.
- **Periodo:** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación, por ejemplo, el tiempo en que un cuerpo se mueve un ciclo completo relacionando al momento de estados idénticos. Este se designa por “t” y usualmente es

expresado en segundos. En la figura 40 se explica el concepto aplicado a un péndulo.

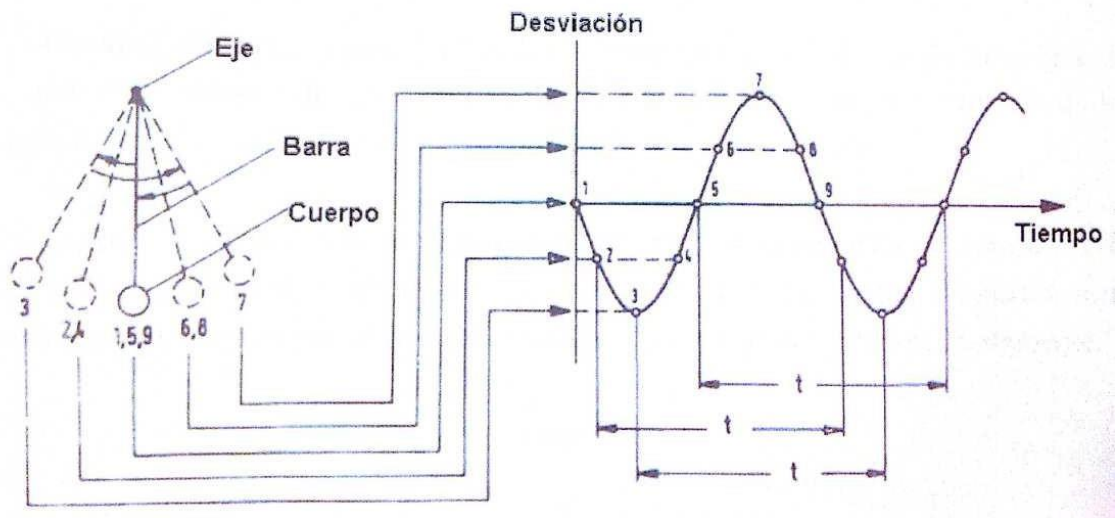


FIGURA 40 OSCILACIÓN DE UN PENDULO. FUENTE [22], pág. 89

- **Frecuencia:** Es la inversa del periodo o el número de oscilaciones (ciclos) por unidad de tiempo. La frecuencia se la designa con “f”, dando la relación:

$$f = \frac{1}{t}$$

Amplitud: Es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio. Si la amplitud, designada por “A”, es constante en el tiempo, la oscilación es no amortiguada, si esta decrece en el tiempo, se la llama amortiguada (ver figura 41).

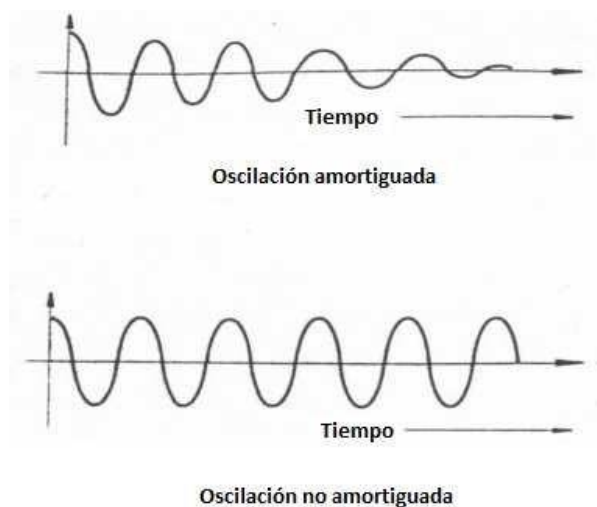


FIGURA 41 OSCILACIONES AMORTIGUADA Y NO AMORTIGUADA [17], pág. 39

- **Onda:** Es la propagación de una oscilación y sucede cuando una partícula oscila transmitiendo su vibración adyacente. Las partículas adyacentes tienen una diferencia de fase constante.
- **Velocidad de propagación (velocidad sónica):** Es la velocidad de propagación de una onda en un material, esta es una propiedad del material. Es designada por “c”.
- **Longitud de onda:** Es la distancia entre dos puntos adyacentes de condición de oscilación equivalente o igual fase. La longitud de onda es una magnitud muy importante, designada por “λ” y cuya relación con otros parámetros es:

$$\lambda = c \cdot t$$

La propagación de las ondas puede ocurrir en dos direcciones, en función de esto, existen dos tipos de onda:

- **Onda longitudinal:** donde la dirección de oscilación de las partículas coincide con la dirección de propagación de la onda.
- **Onda transversal:** donde la dirección de oscilación de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

En cuanto a las ondas acústicas, a diferencia de las ondas electromagnéticas, las ondas térmicas o las ondas luminosas, se propagan a través del medio material. El gas y el líquido no tienen resistencia al corte, por lo que las ondas de corte no pueden propagarse en estos medios. En materiales sólidos, las ondas longitudinales y transversales y todas sus combinaciones pueden propagarse.

En cuanto a las frecuencias, se sabe que no todos los oídos pueden escuchar estas frecuencias. De acuerdo con la práctica internacional, el alcance se puede subdividir de la siguiente manera (ver Figura 42) [22]:

- **Subsónico:** $f < 16$ Hz, rango de vibración debajo del límite audible. No se escuchará ningún tono, solo se notará presión.
- **Sonido audible:** Se encuentra entre los 16 Hz y los 20 KHz, es el rango de frecuencias audible por el ser humano.
- **Ultrasónico:** $f > 20$ KHz, estas frecuencias están por encima del límite de escucha humana. Las frecuencias usuales para los ensayos no destructivos se encuentran en el rango de 0,5 a 25 MHz.

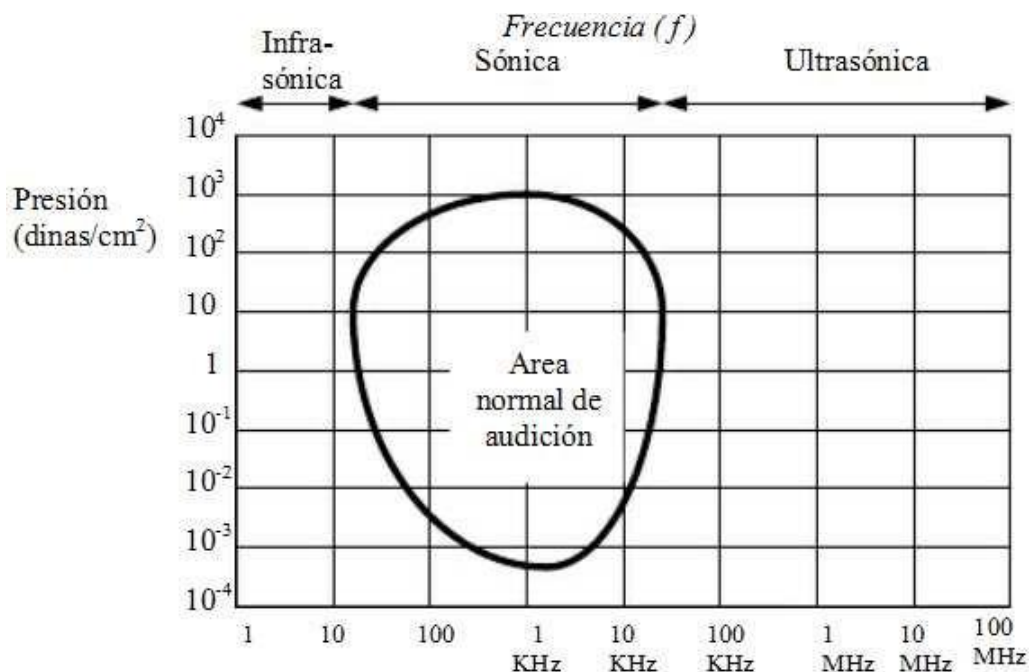


FIGURA 42 ESPECTRO ACÚSTICO. FUENTE [22], pág. 85

4.6.1.2 Definiciones básicas

Si la onda de sonido es perpendicular a la interfaz de dos materiales, parte de la energía del sonido se transmitirá al otro material y la otra parte se reflejará [23], como se muestra en la Figura 43.

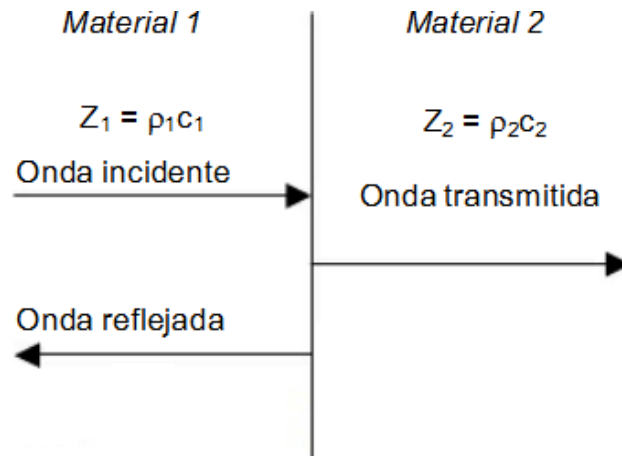


FIGURA 43 INCIDENCIA NORMAL DEL SONIDO EN LA INTERFASE ENTRE DOS MEDIOS. FUENTE [9], pág. 40

Las propiedades de energía transmitida y reflejada dependen de la impedancia de los dos materiales. La impedancia acústica se puede calcular como:

$$Z = \rho \cdot c$$

donde:

- ρ es la densidad del material del medio considerado
- c es la velocidad del sonido en el medio considerado.

Si una onda sónica viaja a través de un medio con impedancia acústica Z_1 , e incide perpendicularmente en una interfase correspondiente a otro material con impedancia acústica Z_2 , se puede definir las siguientes magnitudes:

$$\text{Factor de reflexión: } R^u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\text{Factor de transmisión: } T^u = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

El factor de reflexión da la proporción (%) de presión acústica reflejada y el factor de transmisión da la proporción de presión acústica transmitida en el segundo material. Si la impedancia acústica de los dos medios es igual, no hay reflexión ($R'=0$), y el sonido pasa a través de la interfase sin alterarse. ($T'=1$).

Si la onda de sonido incide en la interfaz en un ángulo oblicuo, el fenómeno que se produce es mucho más complicado que el caso de incidencia normal. Nuevamente hay un componente de reflexión y un componente de transmisión, pero también hace que parte de la energía del sonido se convierta en otro tipo de onda, por lo que habrá dos ondas de reflexión y dos ondas de transmisión, como se muestra en la Figura 44 [24].

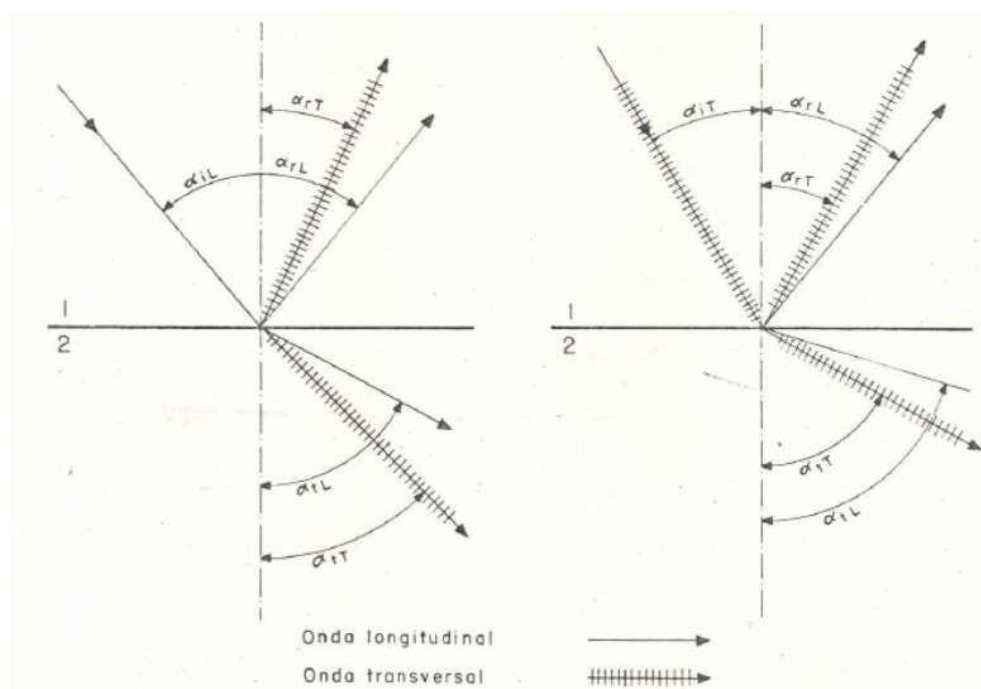


FIGURA 44 INCIDENCIA OBLICUA DE UNA ONDA SÓNICA. FUENTE [9], pág. 48

Por lo tanto, las ondas longitudinales y las ondas transversales reflejadas, las ondas longitudinales y las ondas transversales refractadas se generarán a partir de ondas longitudinales con ángulos de incidencia oblicuos. En medios líquidos y gaseosos, los componentes laterales relevantes desaparecen.

Para estos casos, las mismas leyes de la física se aplican al campo de la óptica, por lo que la ley de Snell se aplica a los siguientes casos:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

4.6.1.3 Dispersión, difracción e interferencia.

Si la onda de sonido encuentra un obstáculo, como un medio con diferentes características acústicas, pueden ocurrir varios fenómenos dependiendo del tamaño del obstáculo. Estos fenómenos se explican junto con la Figura 45.

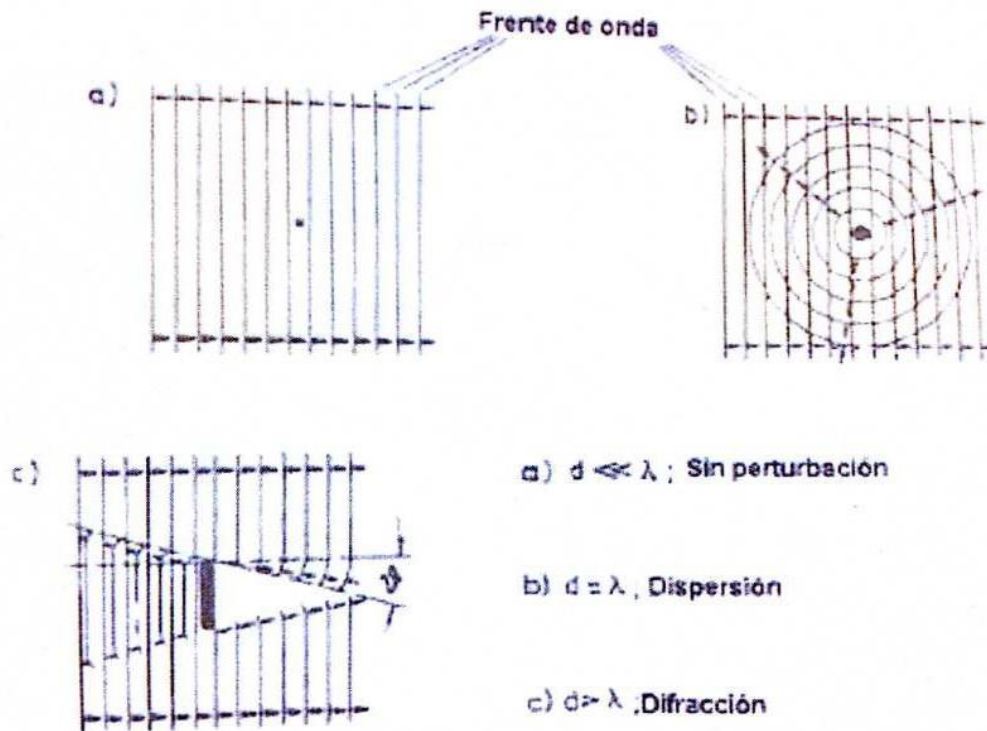


FIGURA 45 DISPERSIÓN Y DIFRACCIÓN DE ONDAS EN OBSTÁCULOS. FUENTE [9], pág. 50

En a), el obstáculo es pequeño en comparación con la longitud de onda, y parece no haber ningún obstáculo cuando la longitud de onda se propaga.

En b), si la longitud de onda del obstáculo es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda, aunque se absorbe parte de la energía de las olas, la interferencia al proceso de propagación es pequeña. Esta energía se propagará como una nueva onda esférica, centrada en el obstáculo. Este proceso se llama dispersión.

En c), tenemos un obstáculo mayor que la longitud de onda, y si también asumimos que la impedancia acústica del obstáculo es muy diferente de la impedancia acústica del entorno circundante, se producirá un reflejo de onda en él. Es cierto que no habrá onda (sombra de onda) propagándose posteriormente, pero esta sombra existirá cada vez. Cuanto mayor sea la distancia del obstáculo, menor será la distancia. Este proceso se llama difracción.

Existe otro fenómeno en el que las nuevas ondas reflejadas se superponen con las ondas reflejadas originales, por lo que, dependiendo de su fase, pueden mejorarse, debilitarse o cancelarse por completo. Si la onda original y la onda reflejada tienen un valor máximo al mismo tiempo, los dos se sumarán. En cambio, la desaparición ocurre cuando un valor máximo coincide con otro valor mínimo. Esta superposición se llama interferencia.

4.6.1.4 Disminución de la presión sónica

A medida que la onda de sonido se aleja del transmisor, la presión del sonido disminuye. Esta reducción tiene las siguientes consecuencias:

- **Divergencia:** El transmisor de sonido emite sonido no solo en una dirección sino también dentro de un rango de ángulo. La sección transversal del haz se vuelve cada vez más grande a medida que aumenta la distancia, por lo que la energía se distribuye sobre el área aumentada. De esta manera, la energía acústica por unidad de área se vuelve cada vez más pequeña, como se muestra en la Figura 46.

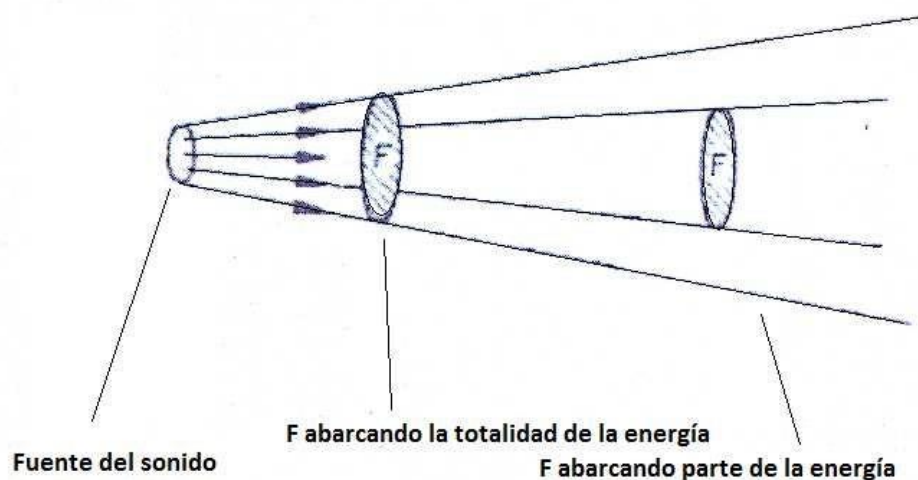


FIGURA 46 REDUCCIÓN DE LA PRESIÓN SÓNICA CAUSADA POR LA DIVERGENCIA. FUENTE [9], pág.

- **Atenuación del sonido:** La atenuación del sonido no es causada por la geometría de la propagación, sino por las características del material. Las razones de este fenómeno incluyen el fenómeno de dispersión o absorción de material debido a la pérdida de energía debido a la fricción entre moléculas. Además del material, la atenuación de la onda de sonido también depende de la frecuencia y el tipo de onda.

La atenuación sónica se mide en decibelios (dB). Se define como:

$$a[\text{db}] = 20 \log \frac{U_1}{U_2}$$

donde:

- U_i son los voltajes eléctricos.
- a es la atenuación de la respuesta de ganancia.

Así, la altura de las indicaciones de los ecos en la pantalla del osciloscopio es proporcional a los voltajes de los impulsos de los ecos, lo que puede ser escrito como:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{H_1}{H_2}$$

donde:

- H es la altura de eco.

Por tanto:

$$a[\text{db}] = 20 \log \frac{H_1}{H_2}$$

Si, por ejemplo, $H_1/H_2 = 2$, encontramos: $a = 20 \cdot \log 2 = 6 \text{ dB}$. Esto significa que una reducción de 6 dB en la altura del eco, corresponde a un decremento de la mitad de su altura.

4.6.2 Principios básicos de los instrumentos

Los instrumentos para pruebas ultrasónicas evolucionan constantemente, pero sus principios básicos son similares.

4.6.2.1 Generación de ultrasonido

Existen muchos métodos para generar ultrasonidos, en principio son los mismos

que los del sonido audible, siempre que se obtengan altas frecuencias naturales, estos métodos son procesos mecánicos. Sin embargo, este procedimiento generalmente no se usa para pruebas no destructivas. Recurrir a otros efectos, como el efecto magnetoestrictivo, especialmente el efecto piezoeléctrico [22].

Los materiales ferromagnéticos tienen las características de contracción o expansión debido a la acción del casquete magnético. Por el contrario, si el material se somete a fuerzas de tracción y compresión, puede generar un campo magnético. Este efecto es magnetoestrictivo y se utiliza para obtener una alta potencia de sonido a frecuencias relativamente bajas.

Sin embargo, el efecto piezoeléctrico es el más utilizado, y su importancia es mucho mayor, y se utiliza casi universalmente para ensayos no destructivos de materiales. Ciertos cristales naturales o sintéticos tienen las siguientes características: En presencia de tensión de tracción o compresión, se generarán cargas en la superficie, y si la dirección de la tensión es opuesta, la carga cambiará de signo. El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, cuando se aplica una carga a la superficie del vidrio, el efecto piezoeléctrico se contrae o expande según el signo de la carga. El voltaje de CA provocará oscilaciones de presión mecánicas.

De la reversibilidad se puede concluir que se puede utilizar el mismo principio para generar y recibir ondas longitudinales ultrasónicas. De hecho, en la mayoría de los casos, se utilizan los mismos cristales transmisores y receptores.

No todos los cristales tienen un efecto piezoeléctrico y solo ocurre bajo ciertas condiciones. El ejemplo más famoso es el cuarzo. Otros ejemplos son los transductores de cerámica sintética que obtienen efectos piezoeléctricos por polarización, siendo algunos de los más importantes el titanato de bario o el sulfato de litio.

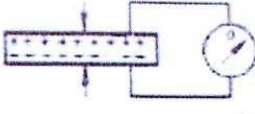
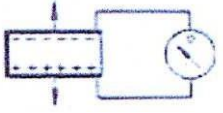
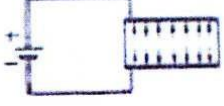
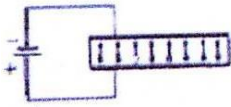
	Causa	Esquema	Efecto
Efecto piezoeléctrico directo	Compresión sobre el cristal		Voltaje positivo sobre las caras
	Tracción sobre el cristal		Voltaje negativo sobre las caras
Efecto piezoeléctrico inverso	Voltaje positivo sobre las caras		Expansión del cristal
	Voltaje negativo sobre las caras		Contracción del cristal

Tabla 2 EJERCICIO PIEZOELÉCTRICO DEL CUARZO. FUENTE [9], pág. 25

4.6.2.2 Procedimiento de ensayo ultrasónico

Básicamente existen dos procedimientos, basados en la evolución de la parte transmitida de la onda o la parte reflejada de la onda, dependiendo de lo que vayamos a estudiar, utilizaremos un procedimiento u otro.

- Procedimiento de transmisión:

Durante este proceso, se evaluará la parte de la onda ultrasónica que se ha transmitido a través de la probeta. El transmisor de sonido se aplica a un lado del componente y el receptor se aplica al otro lado.

En presencia de defectos, la intensidad del sonido del receptor disminuirá debido a la reflexión parcial, o pasará a cero en el caso de la reflexión total (Figura 46). En esta prueba, no se puede determinar la profundidad del defecto de la pieza. El transmisor y el receptor deben estar alineados geométricamente con precisión [26].

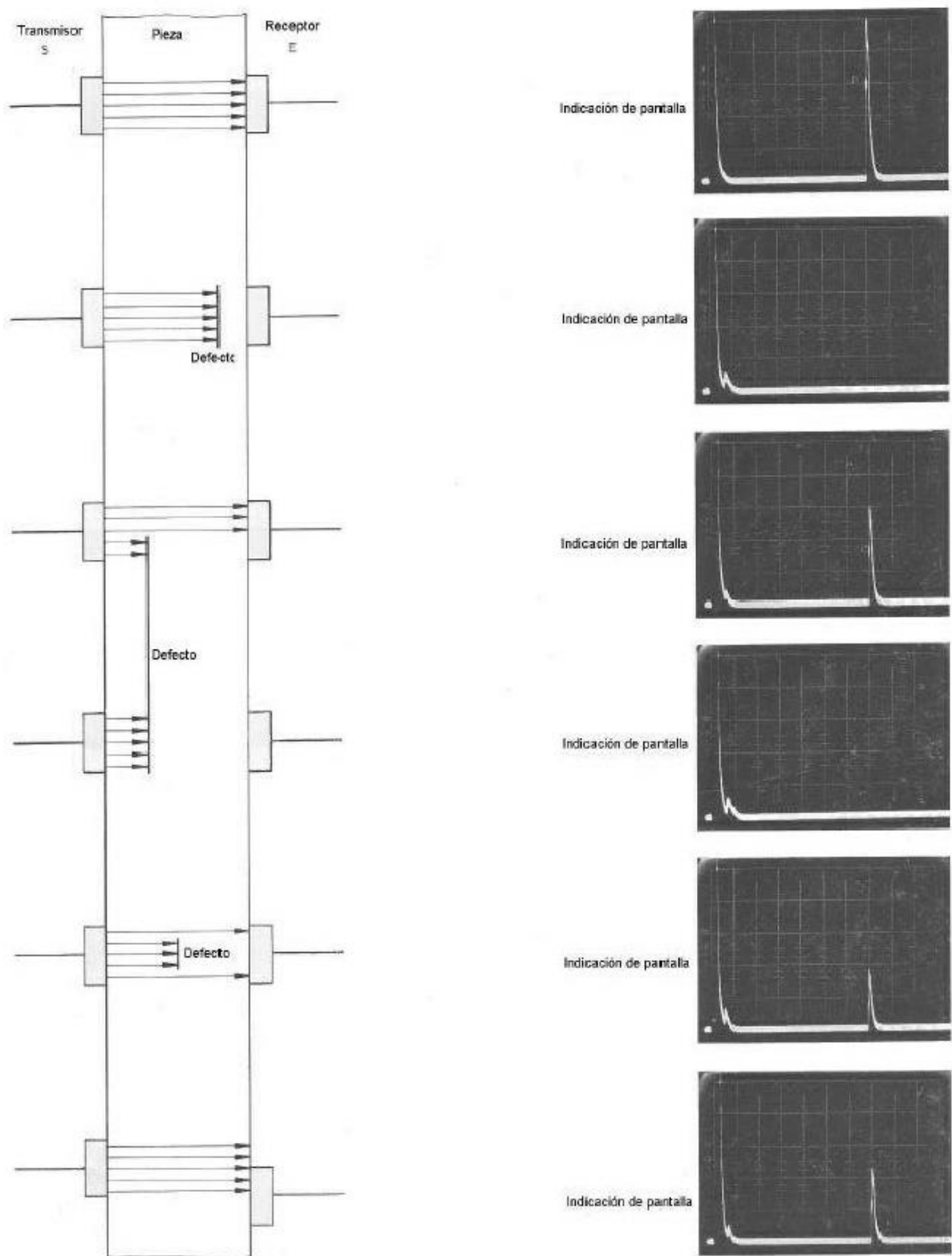


FIGURA 47 MÉTODO POR TRANSMISIÓN. FUENTE [9], pág. 60

- Procedimiento pulso-eco

El oscilador piezoeléctrico actúa como transmisor y receptor. Las ondas sonoras penetran en el material hasta que se reflejan parcial o totalmente

debido a la superficie límite. Si la superficie reflectante es perpendicular a la dirección de propagación de la onda de sonido, se reflejará en su dirección original y después de un cierto período de tiempo, dependiendo de la velocidad del sonido en el material que se mide y la intensidad entre el oscilador. La superficie reflectante llega al oscilador y se convierte en pulsos eléctricos.

No toda la energía devuelta se convierte en energía eléctrica, pero parte de la reflexión se produce de nuevo en la interfaz entre la sonda y la superficie de la pieza, una pequeña parte del sonido pasa a través de la pieza por segunda vez, y así sucesivamente. Como se muestra en la Figura 48 [26].

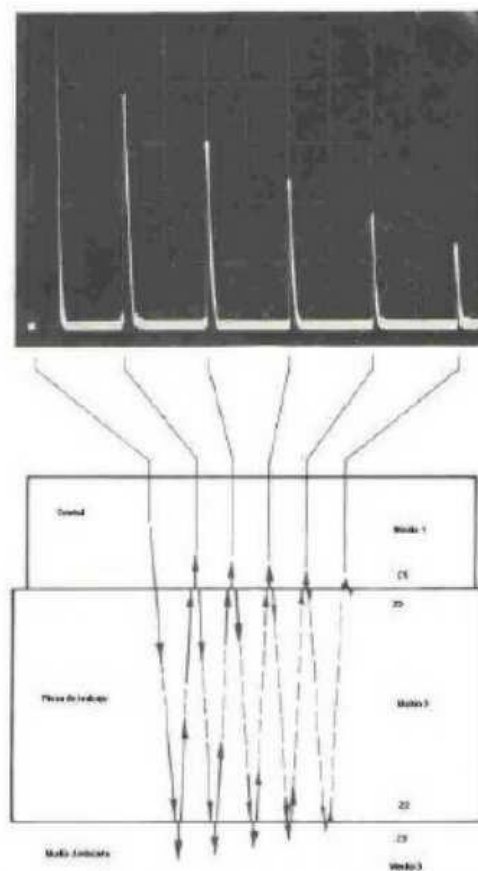


FIGURA 48 FORMACIÓN DE ECOS MÚLTIPLES.
FUENTE [9], pág. 60

Debe tenerse en cuenta que no solo el reverso determina múltiples ecos, sino que también encontramos otros reflectores (defectos).

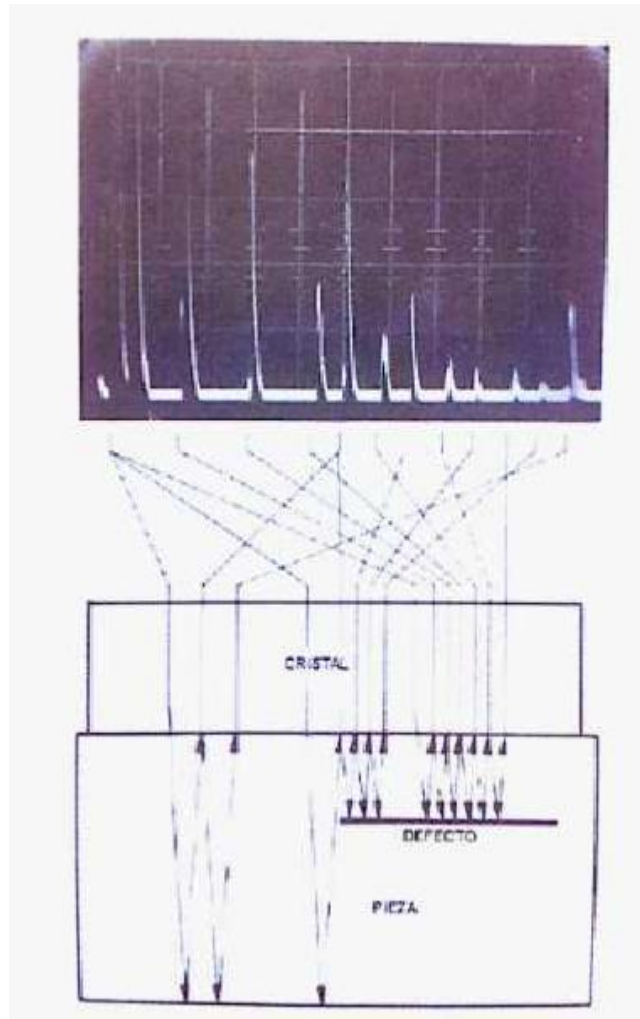


FIGURA 49 ECOS MÚLTIPLES CAUSADOS POR EL ECO DE FONDO Y UN DEFECTO. FUENTE [9], pág. 65

4.6.2.3 Palpadores

Todas las sondas utilizadas en las pruebas ultrasónicas se basan en el efecto piezoeléctrico. La oscilación del cristal vuelve lentamente a su propia frecuencia de resonancia como una campana. Esta frecuencia natural es generada por la siguiente ecuación para la oscilación básica:

$$f_0 = \frac{C}{2d}$$

donde:

- f_0 es la frecuencia natural.
- C es la velocidad del sonido en el material transductor.
- d es el espesor del cristal.

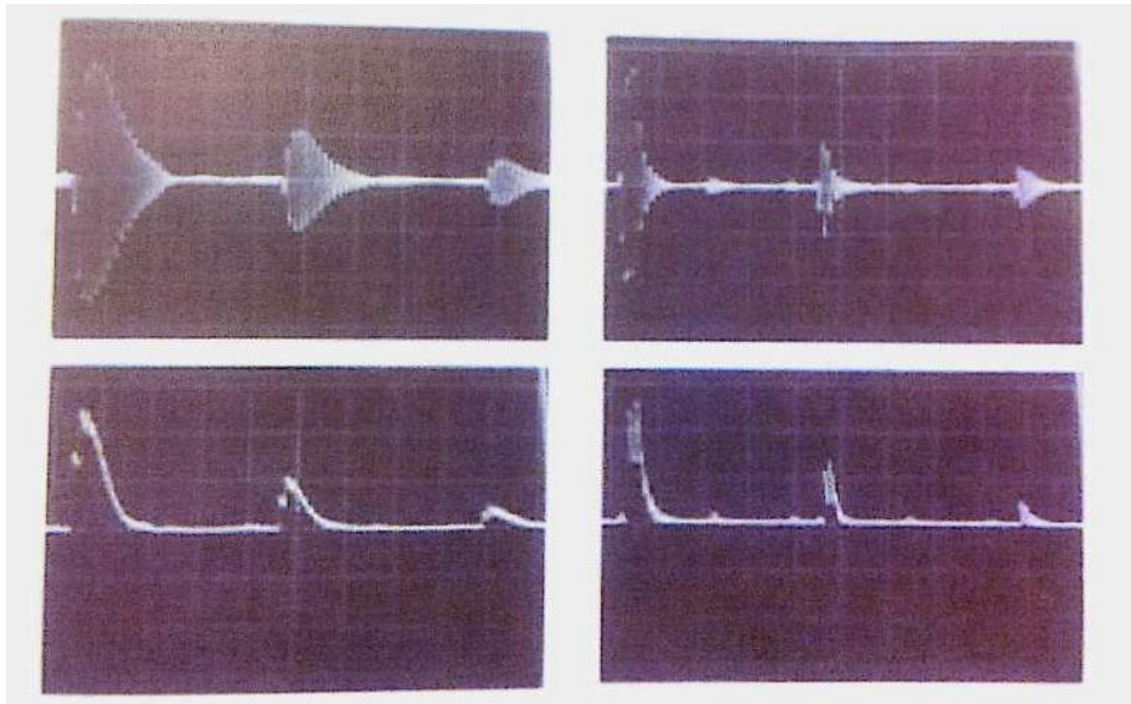


FIGURA 50 VIBRACIÓN DE UN CRISTAL DÉBILMENTE ATENUADO Y OTRO FUERTEMENTE ATENUADO (ARRIBA). LA MISMA SEÑAL SOBRE LA PANTALLA DE TRC DESPUÉS DE RECTIFICADO Y FILTRADA (ABAJO). FUENTE [9], pág. 75

Sin embargo, dado que el procedimiento de eco de pulso debe hacer que el cristal vuelva a actuar como receptor después de un intervalo muy corto, la atenuación de la oscilación inducida debe obtenerse en el menor tiempo posible. Sin embargo, esta atenuación no debe ser demasiado fuerte para reducir drásticamente la sensibilidad de detección. Desafortunadamente, los requisitos de alta sensibilidad de respuesta y el requisito de pulsos estrechos con alta resolución son opuestos entre sí. El término "resolución" se refiere a la capacidad de respuesta de la sonda para dar indicaciones separadas de dos discontinuidades muy próximas y claramente separadas en la pantalla del osciloscopio.

En resumen, el uso de un oscilador débilmente atenuado puede lograr una alta potencia y alta sensibilidad, pero debido al ancho del pulso, la resolución es baja. Con un oscilador fuertemente atenuado, puede obtener alta resolución (pulsos estrechos) y reducir la potencia y la sensibilidad.

Otro parámetro muy importante para evaluar el tamaño del defecto es el campo sonoro. El campo sonoro se denomina zona afectada por la vibración

transmitida por la sonda.

Según los principios físicos, el cristal solo transmite ondas ultrasónicas en la dirección perpendicular a la superficie a la que se aplica la carga, lo que ocurre aproximadamente en forma de un haz de rayos paralelo, cuya sección transversal corresponde a la primera parte de la propagación del diámetro del transductor. A cierta distancia del oscilador, el rayo se abre en forma de cono.



FIGURA 51 DIAGRAMA DEL HAZ ULTRASÓNICO. FUENTE [9], pág. 88

Debido al tamaño limitado de la fuente de radiación (oscilador), la intensidad de la onda ultrasónica no es uniforme en todo el haz, lo que provoca efectos de difracción. La zona muerta es causada por la interferencia causada por la vibración del cristal oscilador y su existencia en el haz, y está determinada por el tiempo de oscilación. El nombre se usa porque cualquier discontinuidad en el cristal se ignora por completo durante la oscilación del cristal, porque la presión sonora del haz es cero en toda la profundidad. Hay grandes fluctuaciones cerca del oscilador, lo que da como resultado un campo con la presión sonora máxima y mínima, que se denomina fenómeno de interferencia del campo ultrasónico en el campo cercano (zona cercana) o zona de Fresnel. Debido a los cambios en el campo cercano, puede ser muy difícil evaluar con precisión las fallas encontradas en esta área de material

- **Palpador normal**

En nombre de una sonda normal, se origina en la dirección en la que se propaga la onda ultrasónica en la pieza. El cristal del transductor tiene una superficie metalizada a la que se pueden aplicar pulsos eléctricos. Una de estas superficies se pega al cuerpo del amortiguador, la otra se puede conectar directamente a la pieza a ensayar (vidrio

desprotegido), o se puede cubrir con una capa de material plástico o cerámico. El cable de conexión soldado a la cara plateada del cristal se extiende hacia arriba, pasando a través del cuerpo de amortiguación, hacia una pequeña bobina que se acopla eléctricamente entre el oscilador o el transmisor de pulsos.

La unidad compuesta por el oscilador, el cuerpo del amortiguador y la bobina también se llama "inserción" o "Nob", y se coloca en un recinto metálico conectado a tierra, como se muestra en la Figura 52 [24].

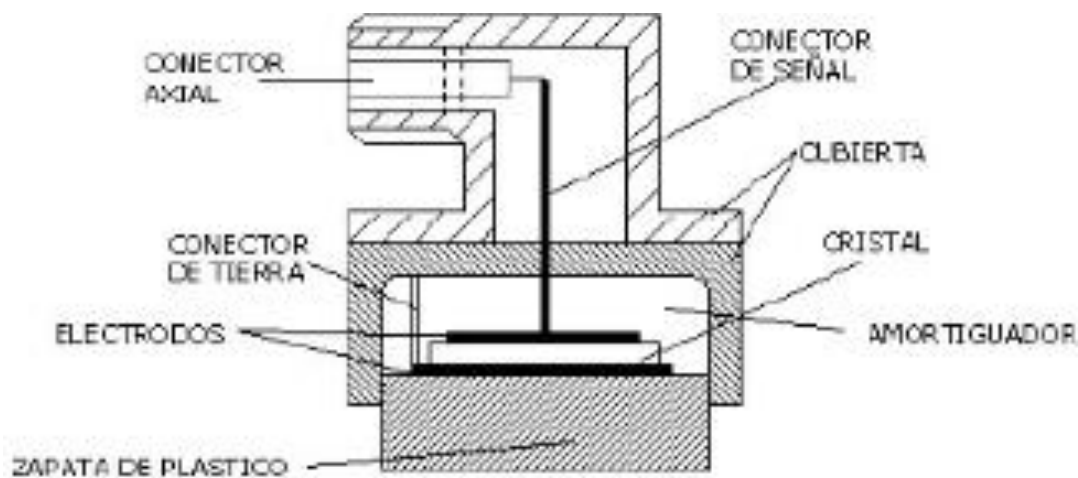


FIGURA 52 CORTE DE UN PALPADOR NORMAL. FUENTE [9], pág. 91

- **Palpador de doble cristal**

La señal recibida por el equipo de ultrasonidos del pulso acústico o la emisión de ultrasonidos "eco" (el primer eco en la pantalla) (que luego se muestra en la pantalla) genera una "zona muerta" para la sonda, que no está en esta zona. Dado que se cubren los signos de posibles defectos, se puede detectar la presencia de discontinuidades. Para solucionar este problema se ha diseñado la sonda E-R. El diagrama esquemático se muestra en la Figura 53. La sonda está compuesta por dos cristales, los cuales están perfectamente aislados eléctrica y acústicamente mediante corcho de cloruro de polivinilo.

Uno de los cristales actúa como transmisor y el otro solo como receptor, ambos cristales están montados sobre una columna de plástico que produce un efecto de enfoque a cierta inclinación para enfocar el haz ultrasónico y obtener la máxima sensibilidad cerca de la superficie. A través de este proceso, se puede

darse cuenta de que, debido a la trayectoria en el plástico, la indicación de la señal transmitida es muy diferente de la indicación de cualquier eco discontinuo [24].

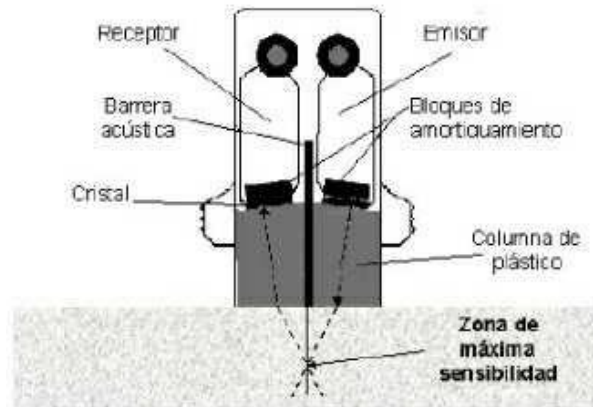


FIGURA 53 PALPADOR DE DOBLE CRISTAL TIPO E-R. FUENTE [9], pág. 96

- Palpador angular

La sonda de contacto angular se compone principalmente de un oscilador, generalmente una onda transversal, que se aplica a una superficie de un prisma de plástico (ver Figura 54) y se corta en un ángulo de incidencia correspondiente al ángulo de refracción o ángulo de penetración requerido. Dado el material de la muestra de ensayo [24].

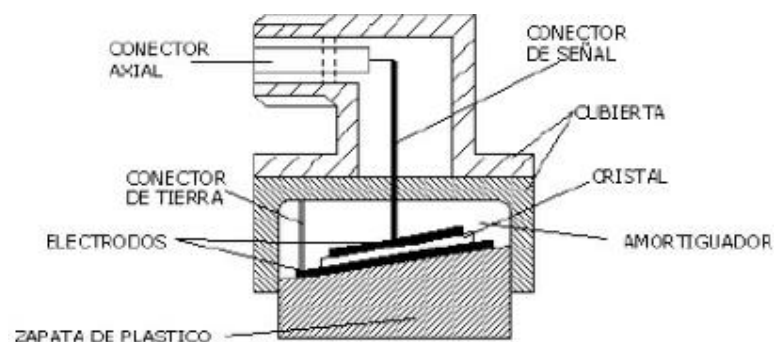


FIGURA 54 CORTE DE UN PALPADOR ANGULAR. FUENTE [9], pág. 102

- Palpador de inmersión

Cuando se requieren exploraciones extensas y de gran volumen para inspeccionar una gran cantidad de muestras o muestras con formas

relativamente complejas, se señala particularmente que las pruebas de inmersión se llevan a cabo sumergiendo la muestra en un tanque o utilizando una sonda de inmersión local. Dado que la transmisión de ondas ultrasónicas desde la sonda a la muestra se realiza a través de una línea de líquido, es decir, no existe contacto directo, presión o fricción entre la sonda y la muestra, entonces:

- Elimina el riesgo de rotura y desgaste del cristal del oscilador, por lo que no es necesario utilizar un fondo protector.
- La frecuencia de uso de cristales es mayor que la de las sondas de contacto porque el riesgo de rotura de los cristales es pequeño.
- Extender el haz ultrasónico en la muestra con el ángulo de penetración requerido, de modo que la inclinación de la sonda con respecto a la superficie de la muestra pueda cambiarse continuamente.
- Dado que no hay contacto ni fricción, la velocidad de la prueba aumenta, por lo que la prueba de inmersión es especialmente adecuada para pruebas automáticas o semiautomáticas.

4.6.2.4 Sistemas de representación

Hay tres tipos básicos de representación de pantallas de TRC para ensayos ultrasónicos:

- Representación “Tipo A”

Es la forma de representación más utilizada en un tubo de rayos catódicos (CRT), donde el indicador se muestra como una desviación vertical en la base de tiempo, es decir, la pantalla muestra el tiempo en una escala horizontal y la amplitud en una escala vertical. Distinga la representación de tipo A de izquierda a derecha.

La altura del eco se puede comparar con la altura del eco de un deflector de referencia conocido para obtener una referencia que indique el tamaño [9].

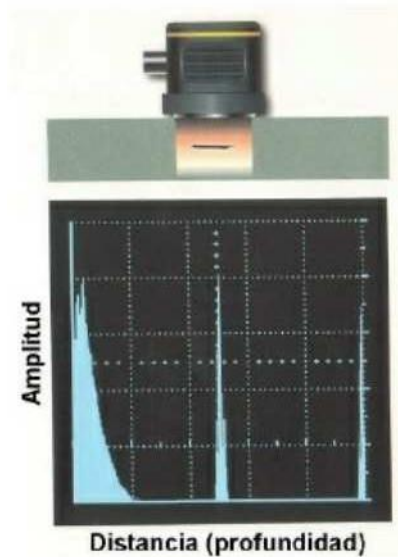


FIGURA 55 REPRESENTACIÓN TIPO A. FUENTE [9], pág. 54

- Representación “Tipo B”

El tipo B significa utilizar una pantalla de osciloscopio típica, que muestra una vista en sección transversal del material que se va a probar. Para obtener un registro permanente, la imagen se retiene en el CRT durante el tiempo necesario para evaluar el trabajo y disparar la pantalla [9].

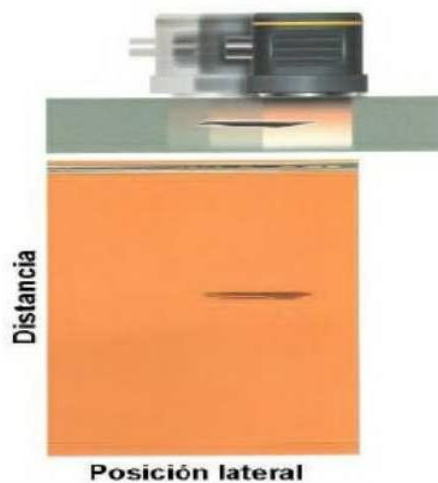


FIGURA 56 REPRESENTACIÓN TIPO B. FUENTE [9], pág. 41

- Representación “Tipo C”

Se muestra una vista en planta similar a una película radiográfica. Además, muestra la forma y posición de la discontinuidad, pero no su profundidad [9].

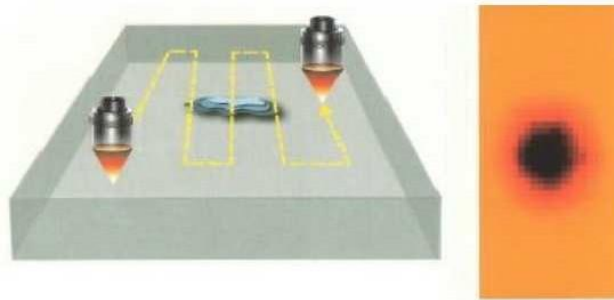


FIGURA 57 REPRESENTACIÓN TIPO C. FUENTE [9], pág. 34

4.6.2.5 Interpretación de la representación Tipo A

La Figura 58 reproduce diagramas de forma de onda obtenidos para los diversos ejemplos de detección de discontinuidad mostrados. Se ha comprobado que, además de detectar pequeñas heterogeneidades, cómo determinar sus posiciones al mismo tiempo es un avance decisivo para la mayoría de aplicaciones [26]:

- Si la discontinuidad es pequeña en comparación con la sección transversal del haz, el eco de fondo de la muestra se obtiene mientras se muestra el eco (Figura 58).
- Si hay múltiples discontinuidades a diferentes distancias, simplemente obtenga Las discontinuidades cercanas a la sonda no "ocultarán" las discontinuidades distantes.
- Si una superficie heterogénea puede interceptar todo el haz, no se mostrará ningún eco de fondo ni otras discontinuidades (Figura 58).
- Cuando la discontinuidad se inclina en relación con el haz de ultrasonido (Figura 58), y también se intercepta todo el haz, no hay signos de eco de fondo o discontinuidad.
- Debido a la falta de paralelismo en la superficie de la muestra (Figura 58) o la alta atenuación dentro del material, la indicación de eco de fondo también puede desaparecer.

- Entre otras cosas, el estado de microporosidad provocará la dispersión del haz ultrasónico, y se obtiene la representación mostrada en la Figura 58, que se caracteriza por una alta dispersión y no puede distinguir ninguna indicación.
- Entre otras cosas, el estado microporoso da como resultado la dispersión del haz de ultrasonidos, obteniendo las características que se muestran en la Figura 58, que se caracteriza por la presencia de alta dispersión, en la que no se puede distinguir ninguna indicación.

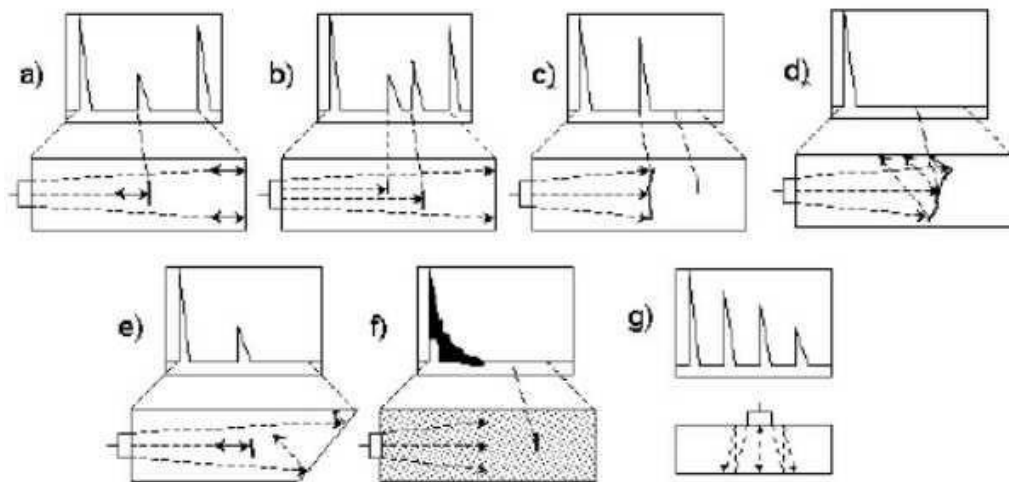


FIGURA 58 INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE LOS DEFECTOS. FUENTE [9], pág. 25

4.6.3 Procedimientos generales del ensayo ultrasónico

En muchos casos, los defectos de las piezas son conocidos o pueden estimarse de forma más o menos fiable. La realización de esta investigación es muy importante porque evitará muchos problemas a la hora de tomar decisiones sobre los procedimientos y los parámetros más adecuados. Por ejemplo, podremos saber que a priori es la dirección que debe tomar el haz para detectar el defecto, o la zona de la pieza donde es más probable que aparezca el defecto. Sin embargo, en todos los casos, se deben seguir algunas recomendaciones básicas para simplificar la tarea. Algunos de ellos se enumeran a continuación y deben considerarse:

- Los defectos verticales se inspeccionarán verticalmente: técnicas de prueba sencillas y sondas fáciles de usar para inspeccionar defectos.
- Está relacionado con la superficie de la pieza a probar: En muchos casos, es más fácil utilizar sondas ordinarias (verticales) que sondas angulares, por lo que serán

las preferidas.

- Cuando sea posible, se utilizará una trayectoria de onda de sonido recta sin cambiar de dirección dentro de la pieza
- Si es posible, las técnicas de prueba que utilizan una sola sonda son más ventajosas que combinarlas en geometrías complejas.
- Una prueba en la que aparece un eco de referencia en la parte inferior del rango de prueba (por ejemplo, un eco en la pared trasera o en el borde) proporcionará mayor seguridad y confianza.
- Por razones económicas, el volumen de la pieza de prueba debe ser lo más grande posible y el área de inspección debe ser lo más pequeña posible.
- Cuando se desconoce la dirección del plano del defecto, la prueba debe realizarse desde diferentes posiciones en la superficie
- El método de transmisión será usado solo cuando el método de pulso-eco falle.

4.6.4 Ventajas y limitaciones

- Ventajas
 - Puede detectar gran variedad de defectos.
 - Puede determinar la profundidad y estimar el tamaño y la forma del defecto.
 - Unidades portátiles.
 - Requiere acceso a una superficie únicamente
 - Las piezas con geometrías sencillas son fáciles de examinar.
 - Ausencia de peligro para el trabajador.
- Limitaciones
 - Dificultad en la inspección de espesores finos.
 - Problemas con materiales de grano grueso o materiales bifásicos.
 - Superficies curvas enfocan o desenfocan el haz.

- No se puede inspeccionar materiales con elevada porosidad.

4.7 MÉTODOS USADOS ACTUALMENTE

A continuación, se discutirán algunos métodos de ensayos no destructivos utilizados por las grandes empresas ferroviarias, así como los métodos desarrollados para situaciones especiales.

4.7.1 Método “Phased Array”

La sonda de *Phased array* es un grupo de sondas rectangulares muy pequeñas que son continuas en una sola carcasa. Normalmente se utilizan 128 elementos de aproximadamente 76 a 102 mm. El circuito generado puede, por ejemplo, conectar los elementos 1 a 4 y hacer que estos elementos emitan luz juntos, y luego mover un elemento activo a un elemento que conecta los elementos 2 a 5 entre sí. De esta manera, se puede realizar un escaneo electrónico. El uso de una matriz en fase lineal para el escaneo electrónico puede reducir significativamente el tiempo de inspección de los componentes que no necesitan cambiar la ley de enfoque o la dirección del haz. Cada componente individual tiene su propio circuito de transmisión y recepción de pulsos. Todos los componentes están conectados y controlados por un sistema de ultrasonido informático que puede activar cada componente de forma independiente. De esta manera, puede crear diferentes formas de onda, cambiar la ley del enfoque, orientar y enfocar al mismo tiempo. Las matrices en fase son sondas divididas en áreas pequeñas, por lo que pueden emitirse electrónicamente para enfocar y guiar con precisión el haz ultrasónico en la dirección seleccionada. Debido a la sensibilidad direccional de los componentes pequeños y la capacidad de enfocar el haz en un área específica, esta solución permite la detección de defectos que son más pequeños que los capturados con una sola sonda larga.

En comparación con otros métodos más tradicionales, las principales ventajas de usar este método son su flexibilidad, mejores capacidades de detección de defectos, mayor cobertura de volumen, menor relación señal-ruido, calibración y prueba fáciles, y mantenimiento y recolección de datos Baja capacidad. Además, en comparación con la inspección manual, mejora la velocidad de inspección y, en comparación con la inspección automática, reduce la complejidad. Le permite cambiar rápidamente la configuración de diferentes diseños de ruedas, permite múltiples escaneos durante el

proceso de inspección y puede realizar inspecciones especiales [2].

4.7.2 Sistema utilizado en torno de foso (Eurostar)

El sistema realiza una inspección ultrasónica automática de las ruedas del tren Eurostar. En el taller de reparación, el torno de reparación existente se utiliza para mover la sonda ultrasónica a través de ruedas, y la inspección se realiza mediante equipos electrónicos y software.

El sistema incluye una sonda de inspección instalada en la estación de herramientas de un torno de fosa. El lápiz usa un rastreador de contacto, que puede moverse para seguir los contornos de los neumáticos del automóvil, por lo que el desgaste de los neumáticos no afectará los resultados. Durante la inspección, la rueda girará 20 veces, lo que significa que puede durar un total de 2 a 4 minutos. El tiempo de calibración es de unos 40 minutos [2].

4.7.3 Sistemas de ultrasonidos para inspeccionar ruedas tras el torneado (sistema desarrollado por la empresa Union Pacific Railroad)

El requisito es revisar las ruedas recién giradas, que están montadas en sus ejes, para buscar defectos internos y superficiales en el área de la llanta. Deben detectarse tanto las fisuras térmicas como los defectos internos en la zona del borde.

El sistema utiliza sondas ultrasónicas de *Phased array*. Estas sondas se fijan e instalan en el tanque de agua, el eje colgará en el tanque de agua y girará alrededor de unos rodillos cerca de la sonda. Esta tecnología se utiliza para mejorar la detección temprana de pequeños defectos y enfocar el escaneo en el área del borde. El sistema utiliza dos palpadores *Phased array* y cuatro sondas fijas para cada rueda. Estas dos *Phased array* se utilizan para inspeccionar el área central de la llanta, una está cerca de la banda de rodadura y la otra está ubicada en la superficie interior para cubrir toda el área de la llanta y realizar un escaneo de enfoque múltiple cuando la rueda está giratorio. El enfoque puede manejar mejor los defectos y tener una mejor resolución cerca de la superficie.

Se utilizan tres sondas para detectar grietas térmicas en la llanta, la banda de rodadura y el área del canal desde la banda de rodadura hasta el ala. La sonda A es común a todas las pruebas y sirve como transmisor y receptor. La sonda fija se utiliza para detectar fisuras térmicas en la zona de la brida, que se encuentra debajo del borde y puede generar ondas superficiales. Los defectos detectados por la sonda deben verificarse mediante inspección local de partículas magnéticas [2].

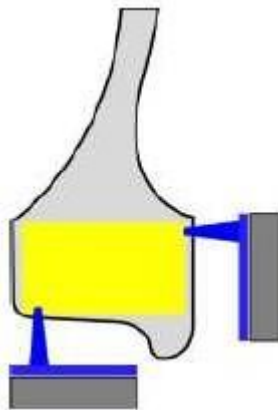


FIGURA 59 INSPECCIÓN DE LA ZONA DE LLANTA. FUENTE [18], pág. 22

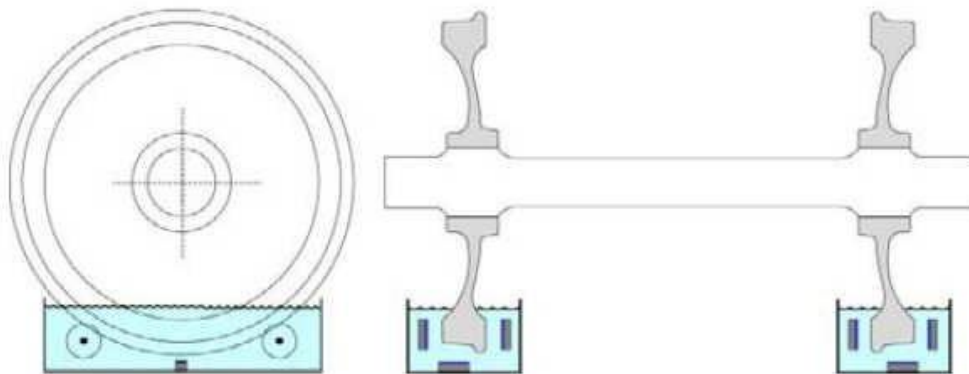


FIGURA 60 POSICIÓN DE LOS PALPADORES Y DE LA CUBETA DE INSPECCIÓN. FUENTE [18], pág. 23

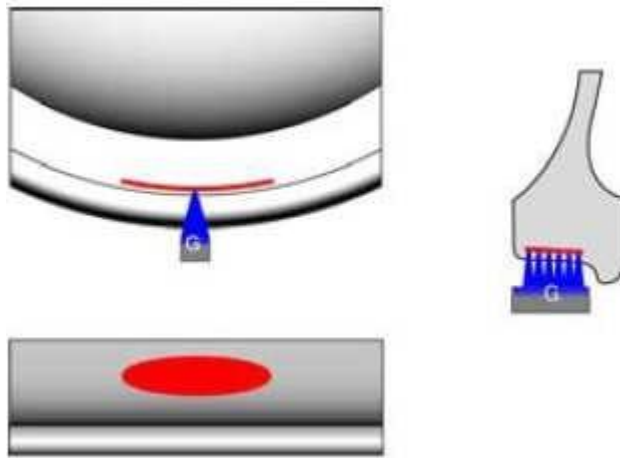


FIGURA 61 INSPECCIÓN EN BUSCA DE DEFECTOS "SHATTERING"
FUENTE [18], pág. 23

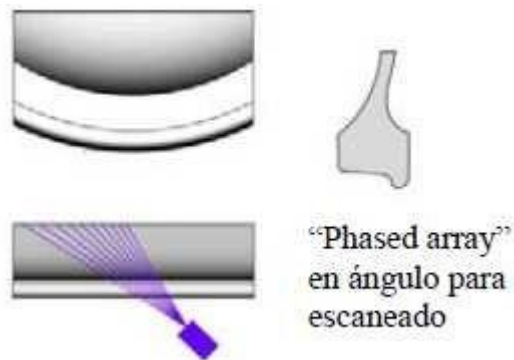


FIGURA 62 INSPECCIÓN EN BUSCA DE GRIETAS TÉRMICAS EN LA ZONA EXTERIOR. FUENTE [18], pág. 24

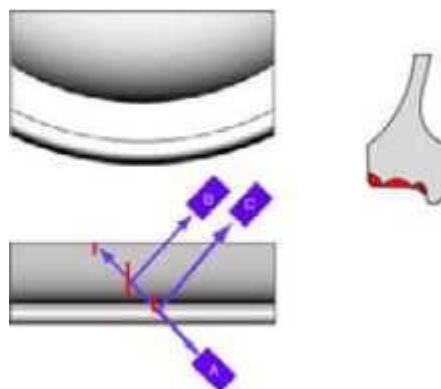


FIGURA 63 INSPECCIÓN EN BUSCA DE
GRIETAS TÉRMICAS EN LA BANDA DE
RODADURA. FUENTE [18], pág. 24

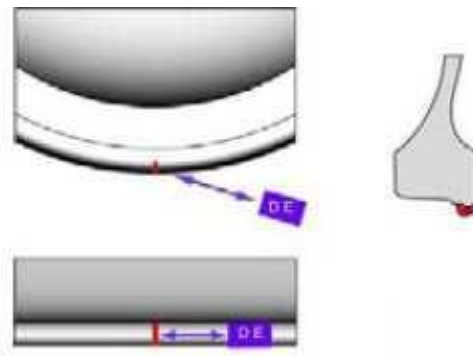


FIGURA 64 INSPECCIÓN EN BUSCA DE GRIETAS TÉRMICAS EN LA PESTAÑA [17], pág. 39

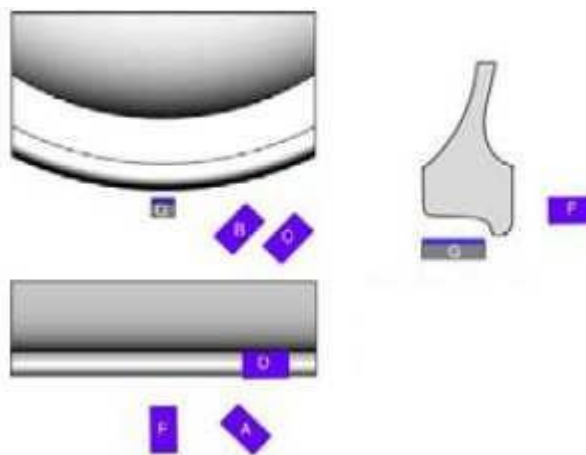


FIGURA 65 VISTA GENERAL DE PALPADORES. FUENTE [18], pág. 25

4.8 INSPECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN BANDA DE RODADURA EN RUEDAS CIVIA

En este apartado se incluye la tecnología utilizada por CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles), responsable de la inspección de ruedas Civia para Renfe [16]. El método que se describe a continuación se utiliza para detectar grietas en la superficie de la banda de rodadura, no en otras partes de la rueda.

El sistema de inspección de ruedas se define en la Directiva IV-UT-CIVIA-02 Ed.b, y debe utilizarse como referencia al configurar los parámetros del equipo (como el área a inspeccionar). Las medidas de seguridad serán obligatorias, y estas medidas se han incluido en el plan de prevención de riesgos laborales de cada empresa.

4.8.1 Equipos y materiales

El estado del equipo utilizado para la inspección debe estar en el estado correcto de conservación y cumplir con los requisitos de calibración aplicables.

- Equipo utilizado:
 - Aparato de impulso-eco con mando de ganancia tarado en dB.
 - Capaz de trabajar en banda de frecuencia de 4MHz.
 - Calibrado en linealidad vertical y horizontal.
- Palpador:
 - Palpador recto bicristal MSEB-4 de Ø 10mm y 4MHz.
- Cable:
 - Tipo coaxial, adecuados para la interconexión de los equipos.

4.8.2 Gráficas de referencia

Esta sección muestra los gráficos realizados con los instrumentos anteriores. Estas cifras representan reflectores artificiales de Ø3 mm a diferentes profundidades. Se trata de un intento de visualizar de forma gráfica y práctica la interpretación del reflector que se muestra en pantalla, pudiendo utilizarse también como imagen de referencia a la hora de evaluar otros tipos de reflectores.

Todas las cifras están referenciadas a 45 dB y están en un campo de visión de 100 mm (recuadro rojo). La modificación del campo de visualización no afectará el ATP del reflector (altura total en la pantalla), pero el cambio de ganancia en dB afectará la visualización / comparación del ATP del reflector con la imagen de referencia.

Esta figura determina el método utilizado para obtener el reflector a través de una rueda estándar del mismo material que una estándar, sobre la que se ha realizado una muesca profunda.

Los ecos restantes que aparecen en lfigura, pero no se citan son el producto de los ecos posteriores al eco principal y los ecos geométricos causados por el original.

- Reflector de Ø 3mm a 21 mm de profundidad

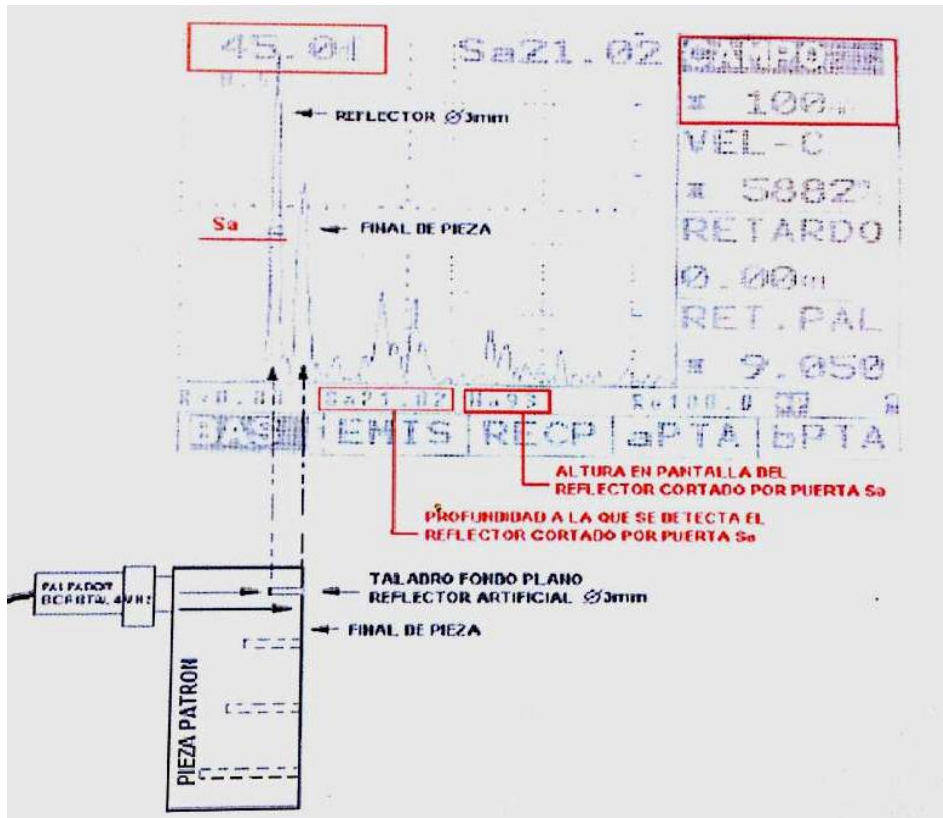


FIGURA 66 REFLECTOR DE $\varnothing 3\text{MM}$ A 21 MM DE PROFUNDIDAD. FUENTE: PROPIA

- Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ 16 mm de profundidad

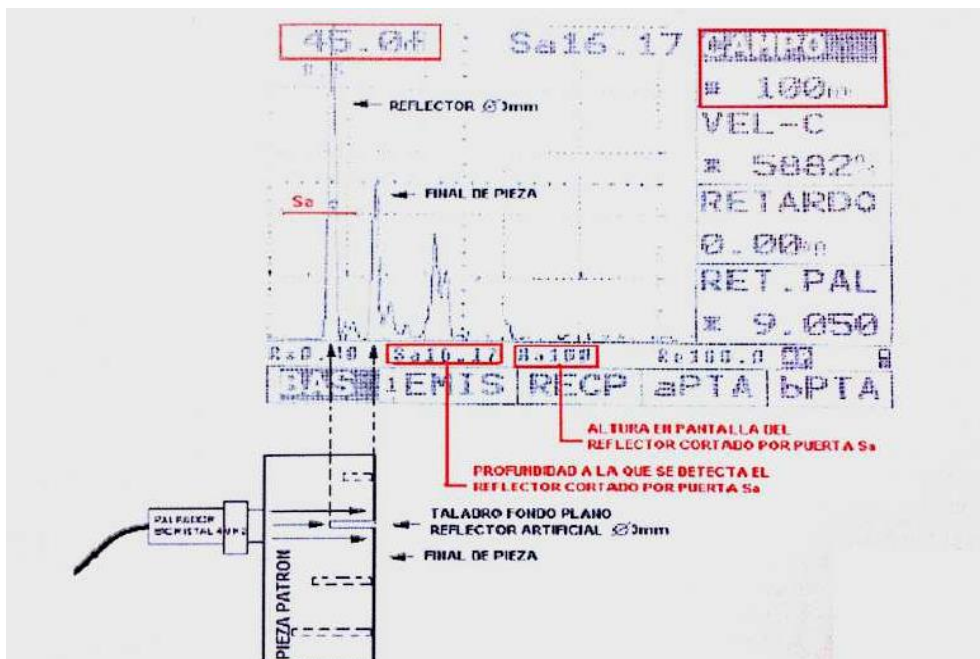


FIGURA 67 REFLECTOR DE $\varnothing 3\text{MM}$ A 16 MM DE PROFUNDIDAD. FUENTE: PROPIA

- Reflector de $\varnothing 3\text{mm}$ 11 mm de profundidad

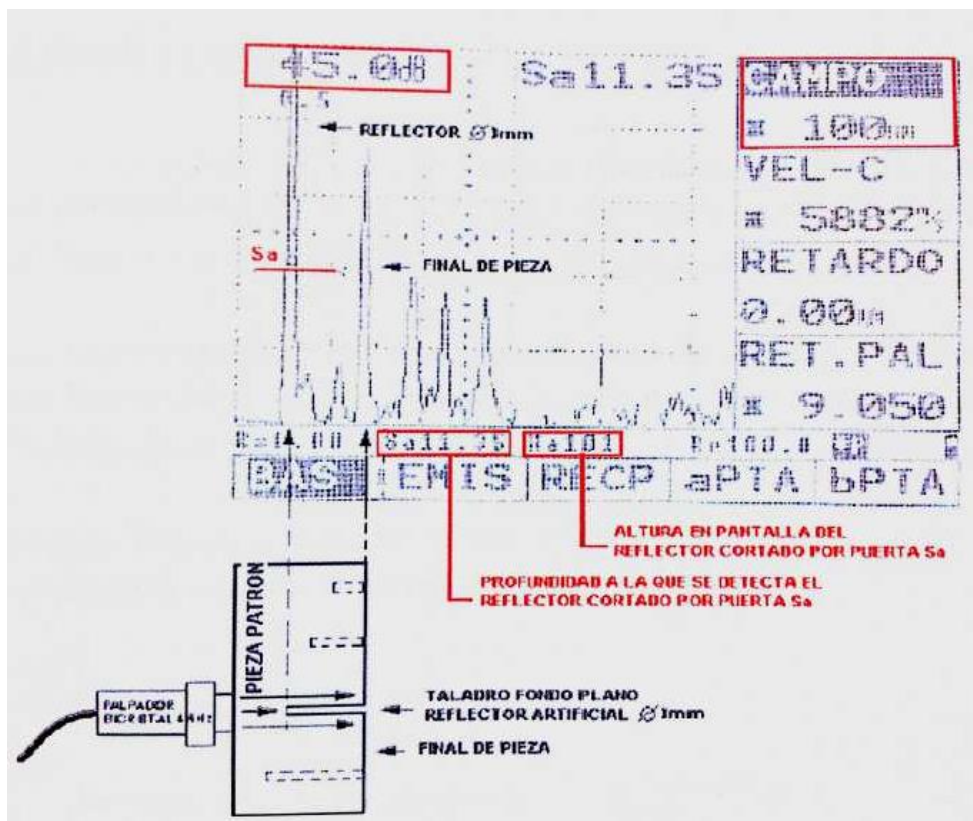
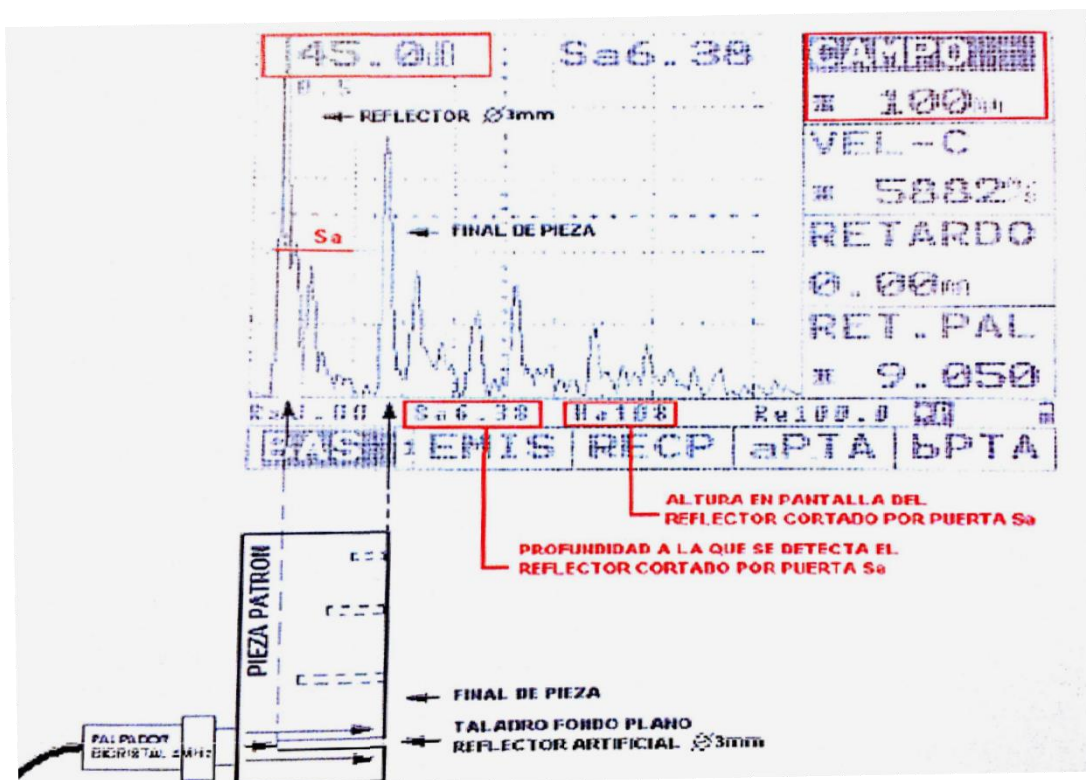


FIGURA 68 REFLECTOR DE Ø3MM A 11 MM DE PROFUNDIDAD. FUENTE: PROPIA

- Reflector de Ø3mm 6 mm de profundidad



4.8.3 Método de medición de discontinuidades

Usando tecnología de atenuación de 6dB, también conocida como eco máximo y medio eco. Basado en este principio, cuando el eje del haz es tangente al borde discontinuo, la amplitud de la señal se reducirá al 50% de su altura inicial.

Se recomienda utilizar esta técnica en discontinuidades paralelas al perfil de la banda de rodadura (más común) Si las discontinuidades tienen diferentes trazos, los límites deben trazarse desde diferentes proyecciones.

El procedimiento a seguir se describe en los siguientes pasos:

1. Una vez detectada la discontinuidad, se localiza el punto de mayor altura de reflexión. En el caso que se salga de la pantalla, se actúa sobre el mando de ganancia hasta fijarlo a una determinada altura, en este caso del 80% de la ATP.

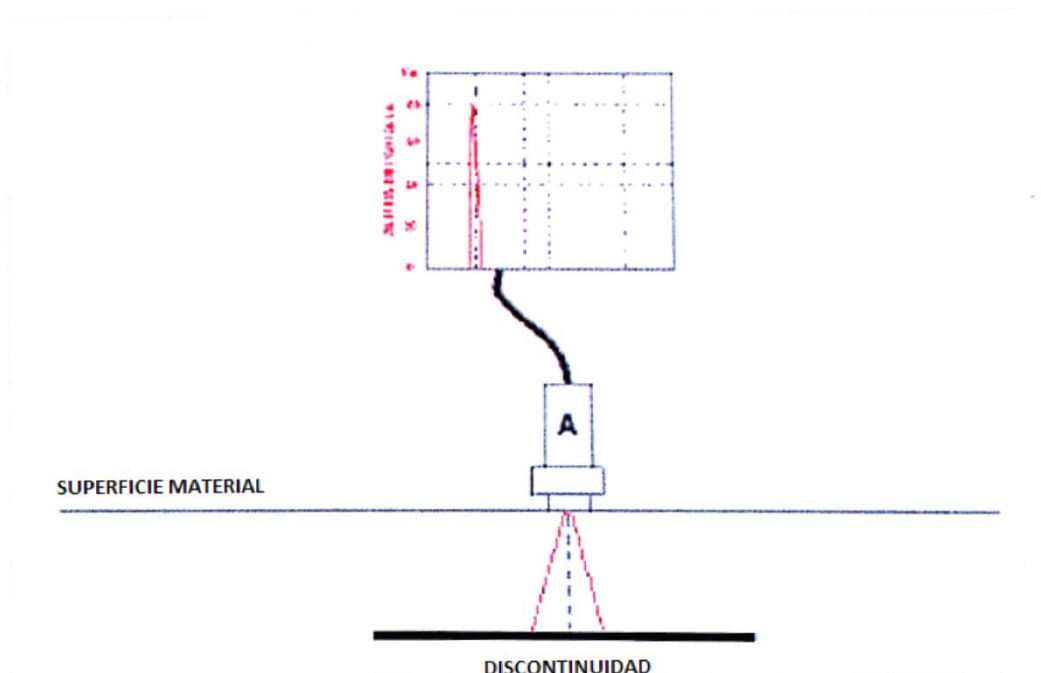


FIGURA 70 SUPERFICIE MATERIAL. FUENTE [12], pág. 60

2. Desplazar el palpador hasta que se observe que el eco producido por la discontinuidad alcanza la mitad de la altura máxima, en este caso el 40% de la ATP. En ese momento realizamos una marca sobre el material desde la mitad de la base del palpador, con esto se consigue identificar una discontinuidad.

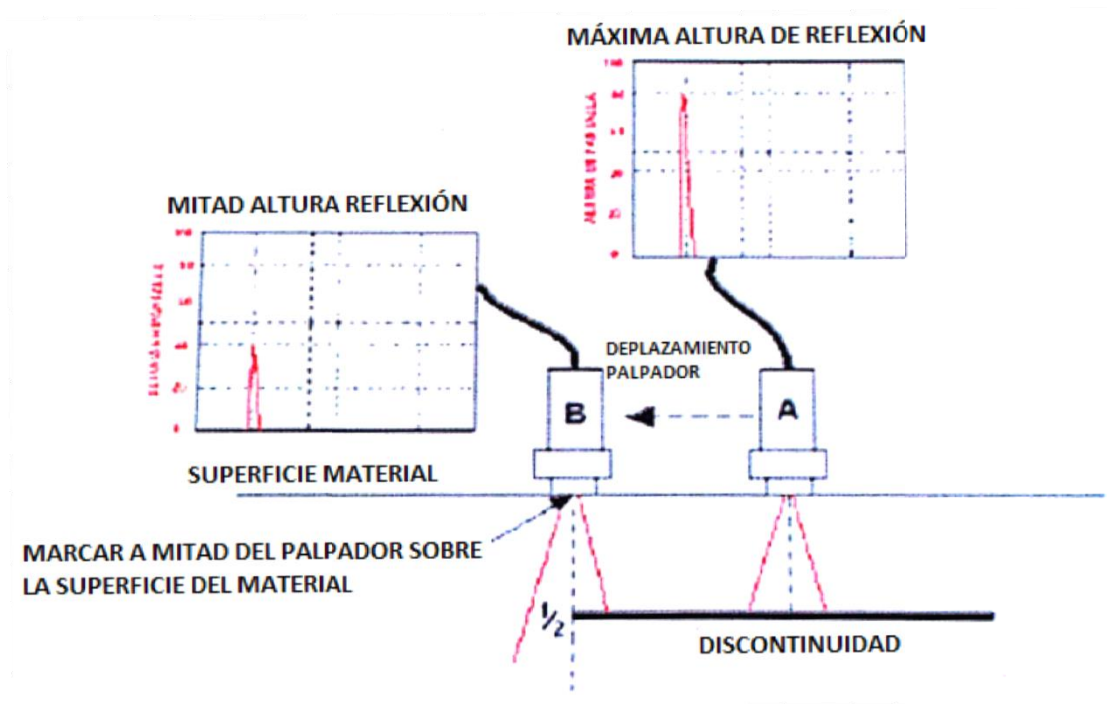


FIGURA 71 MEDICIÓN DE LA DISCONTINUIDAD. FUENTE [12], pág. 60

3. Se vuelve a realizar el desplazamiento, pero en sentido contrario al anterior y se marca el otro extremo de la discontinuidad.

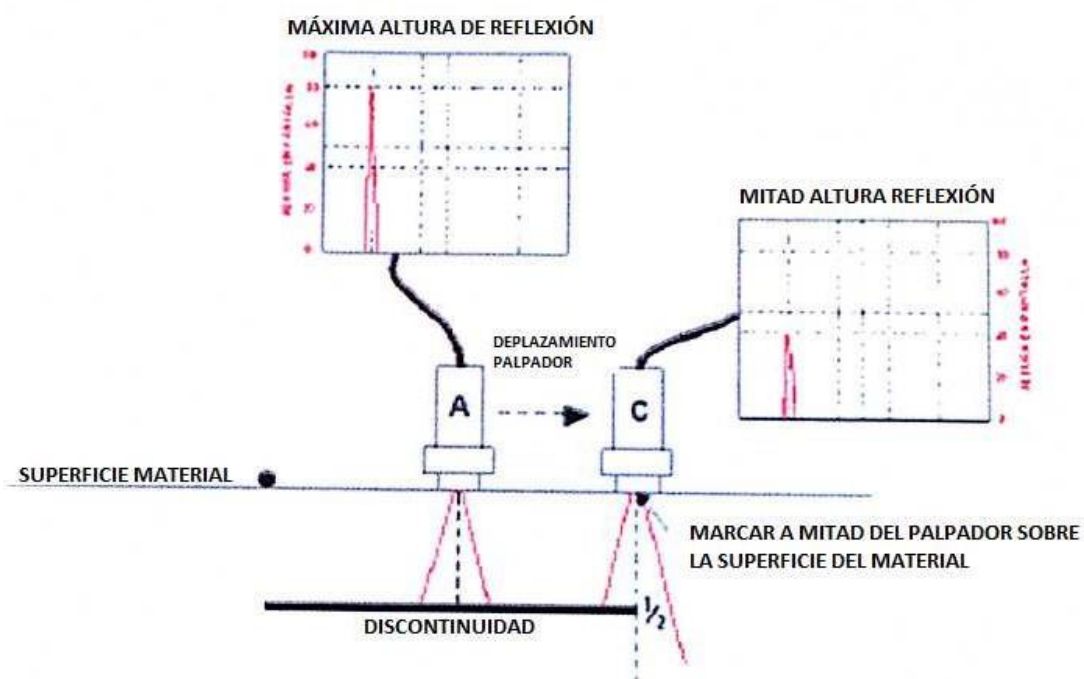


FIGURA 72 MEDICIÓN DE LA DISCONTINUIDAD (PASO 3). FUENTE [12], pág. 64

4. Realizamos la medición entre marcas realizadas en el material y cuantificamos la extensión. De esta manera se termina con el proceso de medición.

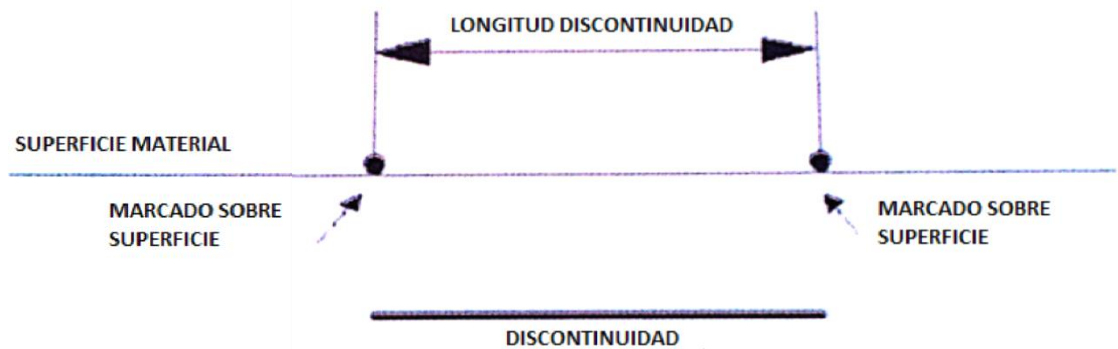


FIGURA 73 MEDICIÓN DE LA DISCONTINUIDAD (PASO 4). FUENTE [12], pág. 65

5. Las discontinuidades se pueden presentar de formas muy variadas, con lo cual, para asegurar la correcta inspección, este proceso se debe realizar en varias direcciones y desde distintos planos de proyección, con lo que se podrá conocer la geometría de la discontinuidad.

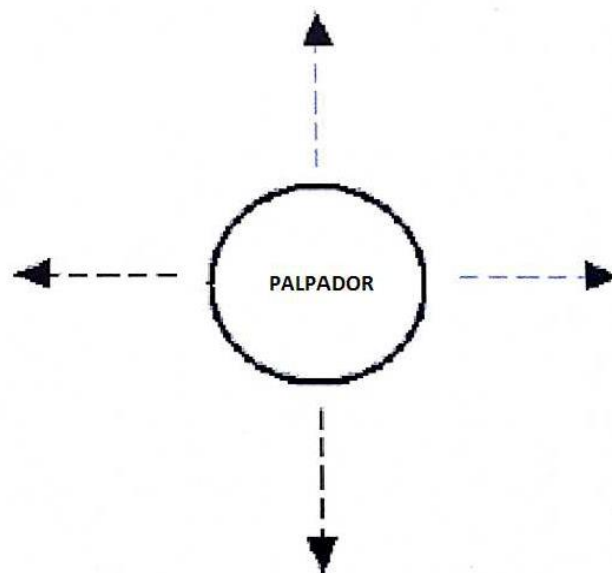


FIGURA 74 MEDICIÓN DE LA DISCONTINUIDAD (PASO 5). FUENTE [12], pág. 67

Este es el método utilizado por CAF para determinar las discontinuidades del subsuelo en la banda de rodadura de la unidad Civia. Sin embargo, existen otros métodos y / o parámetros que no tienen por qué coincidir con esto.

A modo de ejemplo y mostrando la imagen real de la prueba de ultrasonido, a continuación, se muestran los resultados obtenidos con la sonda EMAT [2].



FIGURA 75 RUEDA CON PLANO E IMAGEN OBTENIDA CON PALPADORES EMAT. FUENTE [12], pág. 58

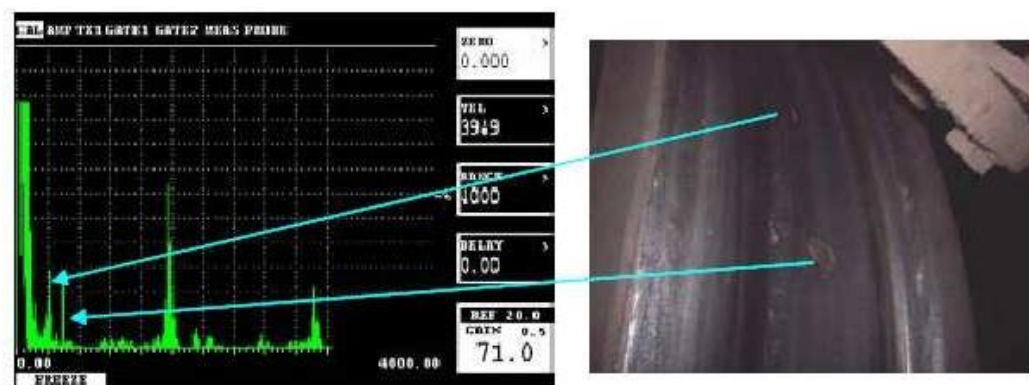


FIGURA 76 RUEDA CON PEQUEÑAS COQUERAS E IMAGEN OBTENIDA CON PALPADORES EMAT. FUENTE [12], pág. 59

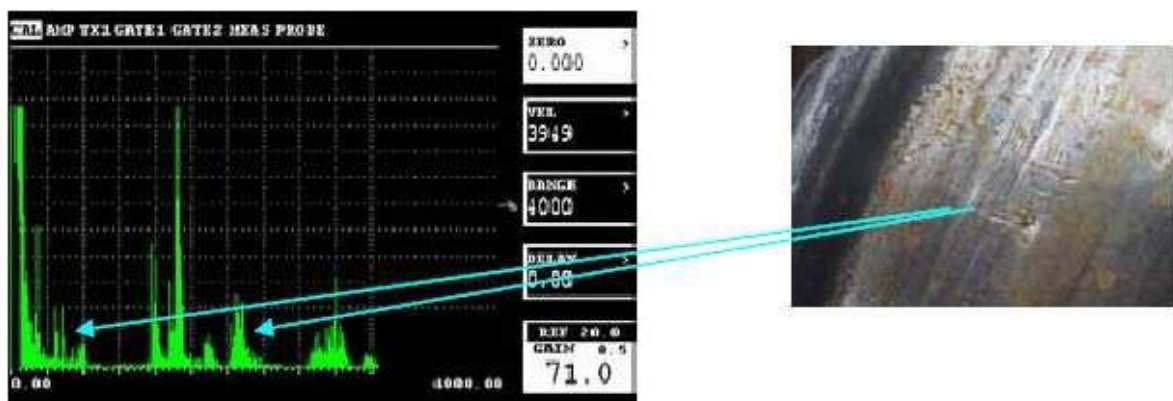


FIGURA 77 RUEDA CON LA BANDA DE RODADURA MARCADA POR GOLPES E IMAGEN OBTENIDA. FUENTE [12], pág. 64

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se exponen las conclusiones más importantes extraídas del Trabajo Fin de Grado:

- La importancia de las ruedas de ferrocarril como componente básico de los trenes destaca la envergadura de un correcto mantenimiento predictivo, que puede evitar que nos encontremos con descarrilamientos graves.
- El proceso de fabricación de ruedas es un aspecto de gran valor para el control porque es donde aparecen por primera vez inclusiones y defectos, por lo que la mejora del proceso y la calidad mejorará el rendimiento de las ruedas de ferrocarril.
- Hay muchos tipos de daños en las ruedas, dependiendo de muchos factores que no siempre se pueden controlar al 100%. Por lo tanto, comprender estos aspectos nos permitirá tomar la decisión correcta para evitar daños en las ruedas y centrarnos en el desgaste de las correas y el desgaste de las correas. dañar. Las pestañas son causadas por fatiga y deformaciones.
- La mecánica de la fractura aplicada a las ruedas de ferrocarril es un tema de aplicación reciente, por lo que un conocimiento preciso del sistema de fractura mejorará los materiales utilizados en la fabricación de ruedas.
- El mantenimiento de las ruedas de ferrocarril es fundamental para evitar fallas catastróficas, y una parte importante de este mantenimiento son las pruebas no destructivas.
- Entre todas las tecnologías de prueba no destructivas utilizadas para ruedas de ferrocarril, la más importante hoy en día es la tecnología ultrasónica, que es la tecnología utilizada por la mayoría de las grandes empresas para detectar grietas porque es una tecnología más rentable.

6. REFERENCIAS

- [1] MOLINA, Belén. *Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Octubre, 2006.
- [2] GARCÍA, Joaquín. *Medición de Parámetros de rodadura en Ramas Alaris UT-490*. Edición 0. Departamento de Ingeniería, Alstom. Octubre, 1999.
- [3] KOPPERS, Ulrich (2007) *State of the art wheel production. Latest equipment and technology*. 15th International Wheelset Congress, Praga (República Checa), 23-27 septiembre 2007.
- [4] UIC 812-3 (5ª Edición, 1984) *Especificación Técnica para el suministro de ruedas monobloque de acero no aleado laminado para el material rodante motor y remolcado*.
- [5] HERREROS, Arturo. *Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid. Abril, 2010.
- [6] DIENER, M., SPEIDEL, M.O.: *Bruch eines Eisenbahn-Vollrades, Untersuchungsbericht*, Inst. für Metallforschung, ETH Zürich, Oktober 1991.
- [7] ORE FRAGE B 169, *Thermische Grenzen der Räder und Bremsklötze*, Bericht Nr. 3: Erforschung der Bruchschwelle, Oktober 1991.
- [8] DIENER, M., KUNNES, W., MÜLLER, R., *Bruchzähigkeit von Eisenbahnrädern und Methoden zu ihrer Bestimmung*, ORE DT 251 (Question B 169), Oct. 1991.
- [9] FERNANDEZ SUSMOZAS, Ángel. *Estudio de fisuras en ruedas ferroviarias y del reperfilado en vehículos Civia*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid. Enero, 2009.
- [10] ASTM E 399: *Standard test method for plain-strain fracture toughness of metallic materials*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01 (Revision 05), Philadelphia, 2005

- [11] JORDI, L., PUIG, J., CARDONA, S. FLÓREZ, E. G. *Evaluación de la severidad de un plano en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren*. Dpt. Enginyeria Mecànica. Universitat Politècnica de Catalunya. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- [12] UGUINA, Luis M. *Guía práctica de medición de discontinuidades por ultrasonidos*. Departamento de calidad M.I. de la empresa CAF. Julio, 2008.
- [13] RAYMOND A. SERWAY, John W. Jewett. *Electricidad y Magnetismo*. Ed. Paraninfo. 2006
- [14] FERRER, Carlos, AMIGO, Vicente. *Tecnología de Materiales*, Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicación, 2003.
- [15] GONZÁLEZ ARIAS, ARNALDO. *¿Qué es el magnetismo?*, Universidad de Salamanca. Ed. Universidad de Salamanca, 2001.
- [16] TIPLER, Paul Allen, MOSCA, Gene. *Física para la Ciencia y la Tecnología* (Vol. I) (5ªEd.).
- [17] CARRIÓN VIRAMONTES, Francisco J. *Evaluación no destructiva de materiales Estructurales y Puentes*
- [18] PEREDO, Álvarez, FERNANDO, Alberto. *Posicionamiento Ultrasónico*. Ciria Udlap
- [19] RECALDE GONZALO, Federico. *Ensayos no destructivos*. Elementos de Máquinas, 2009
- [20] GUTIÉRREZ, Antonio. *Ultrasonidos*. Cap. 2, 3 y 4. Scribd
- [21] GUERRA, CHACÓN, E., LAFONT, P., ECHÁVARRI, *Cálculo de la resistencia a la fatiga superficial en superficies con lubricación elastohidrodinámica mediante el criterio de Dang Van*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [22] EKBERG, A. *Rolling contact fatigue of railway wheels and rails*.
- [23] GHIDINI A. *Mechanical behavior of materials for railways solid wheels*.
- [24] DIENER, M., GHIDINI, A., FORCELL, R., SCHNEIDER, J. (2007) *Development of testing methodologies according to fracture mechanics criteria applied to railways*

solid wheels. 15th International Wheelset Congress, Praga, 23-27 septiembre 2007.

[25] DIENER, M., GHIDINI, A., FORCELL, R., SCHNEIDER, J. (2007) *Fracture mechanics applied to the railways solid wheels manufacturing process*. 15th International Wheelset Congress, Praga, 23-27 septiembre 2007.

ANEXO II: Aviso responsabilidad UC

AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado, así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”